Bibliothèque de Philosophie scientifique

Dirigée par le Dr Gustave Le Bon

ABEL REY

Professeur à la Sorbonne

Le retour éternel et la philosophie de la physique

ERNEST FLAMMARION, ÉDITEUR

26, RUE RACINE, PARIS

Bibliothèque de Philosophie scientifique (*suite*)

3° HISTOIRE GÉNÉRALE

ALEXINSKY (Grégoire), ancien député à la Douma. **La Russie moderne** (8e mille).

ALEXINSKY (Grégoire). **La Russie et l'Europe** (5e mille).

AVENEL (Vicomte Georges d'). **Découvertes d'histoire sociale** (7e mille).

BIOTTOT (Colonel). **Les Grands inspirés devant la Science. Jeanne d'Arc.**

BOUCHÉ-LECLERCQ (A.), de l'Institut. **L'Intolérance religieuse et la politique** (5e m.)

CAZAMIAN (Louis). **La Grande-Bretagne et la guerre** (5e mille).

CHARRIAUT (Louis) et M.-L. AMICI-GROSSI. **L'Italie en guerre** (5e mille).

COLIN (J.), Général. **Les Transformations de la guerre** (7e mille).

COLIN (J.), Général. **Les Grandes batailles de l'Histoire.** *De l'antiquité à 1913* (7e m.)

DEONNA (W.), Professeur à l'Université de Genève. **L'Archéologie.**

DIEHL (Ch.), de l'Institut. **Byzance, grandeur et décadence** (10e mille).

GENNEP. **Formation des Légendes** (6e m.)

GUIGNEBERT (Charles), professeur à la Sorbonne. **Le Christianisme antique** (5e mille).

GUIGNEBERT (Charles), professeur à la Sorbonne. **Le Christianisme médiéval et moderne.**

HARMAND (J.), ambassadeur. **Domination et Colonisation** (4e mille).

HILL, ancien ambassadeur. **L'État moderne** (4e mille).

HOMO (Léon), professeur à la faculté des lettres de Lyon. **Problèmes sociaux de jadis et d'à présent.**

HOVELAQUE (Émile), Inspectr général de l'Instruction publique. **Les Peuples d'Extrême-Orient : La Chine** (5e mille).

HOVELAQUE (Émile), Inspectr général de l'Instruction publique. **Les Peuples d'Extrême-Orient : Le Japon** (4e mille).

LEGER (Louis), de l'Institut. **Le Panslavisme** (4e mille).

LICHTENBERGER (H.), professeur adjoint à la Sorbonne. **L'Allemagne moderne** (14e m.)

LICHTENBERGER (H.) et Paul PETIT. **L'Impérialisme économique allemand** (7e m.)

MEYNIER (Colonel O.). **L'Afrique noire** (6e m.)

MICHELS (Robert), professeur à l'Université de Turin. **Les Partis politiques.** (4e mille).

MUZET (A.). **Le Monde balkanique** (5e m.).

NAUDEAU (Ludovic). **Le Japon moderne, son Évolution.** (11e mille).

OLLIVIER (E.), de l'Académie française. **Philosophie d'une Guerre (1870)** (6e mille).

OSTWALD (W.), professeur à l'Université de Leipzig. **Les Grands Hommes** (5e mille).

4° HISTOIRE DES DÉMOCRATIES

AURIAC (Jules d'). **La Nationalité française, sa formation.**

BATIFFOL (Louis). **Les anciennes Républiques alsaciennes** (5e mille).

BLOCH (G.), professeur à la Sorbonne. **La République romaine** (6e mille).

BLOCH (G.), professeur à la Sorbonne. **L'Empire romain** (5e mille).

BORGHÈSE (Prince G.). **L'Italie moderne** (5e mille).

CAZAMIAN (Louis), me de Conférences à la Sorbonne. **L'Angleterre moderne** (7e m.)

CHARRIAUT. **La Belgique moderne** (9e m.).

COLSON (C.), de l'Institut. **Organisme économique et Désordre social** (5e mille).

CROISET (A.), de l'Institut. **Les Démocraties antiques** (10e mille).

DIEHL (Charles), de l'Institut. **Une république praticienne, Venise** (9e mille)

GARCIA-CALDERON (F.). **Les Démocraties latines de l'Amérique** (6e mille).

HANOTAUX (Gabriel), de l'Académie française. **La Démocratie et le Travail** (8e mille).

LE BON (Dr Gustave). **La Révolution Française et la Psychologie des Révolutions** (16e mille).

LUCHAIRE (J.), Dr de l'Institut de Florence. **Les anciennes Démocraties italiennes** (5e mille).

PICAVET (C.-G.), pr adjoint à l'Univeristé de Toulouse. **Une Démocratie historique. La Suisse** (4e mille).

PIRENNE (H.), Profr à l'Université de Gand. **Les anciennes Démocraties des Pays-Bas** (5e mille).

ROZ (Firmin). **L'Énergie americaine** (11e m.)

ROZ (Firmin). **L'Amérique nouvelle.**

STEED, BOUGLE, BOUTROUX, etc. **Les Démocraties modernes** (4e mille).

Le retour éternel et la philosophie de la physique

DU MÊME AUTEUR

LA PHILOSOPHIE MODERNE (15e mille). (Bibliothèque de Philosophie scientifique). Flammarion, 1908. 1 vol. in-18.

LA THÉORIE DE LA PHYSIQUE CHEZ LES PHYSICIENS CONTEMPORAINS. Alcan, 1907. 1 vol. in-8°.

L'ÉNERGÉTIQUE ET LE MÉCANISME. Alcan, 1907. 1 vol. in-12.

Bibliothèque de Philosophie scientifique

ABEL REY

PROFESSEUR A LA SORBONNE

Le retour éternel et la philosophie de la physique

ERNEST FLAMMARION, ÉDITEUR

26, RUE RACINE, PARIS

1927

AVANT-PROPOS

Nous avons étudié dans des travaux antérieurs la physique contemporaine au point de vue de la conception générale que s'en faisaient les physiciens, de la manière dont ils envisageaient l'œuvre et le travail scientifiques, dont ils faisaient la théorie de leur science. Cette étude nous a amené à conclure, sur la valeur même de cette science, qu'à travers les hypothèses, elle atteignait des rapports *réels* qui sous-tendent notre intuition sensible de la matière et l'organisent en dehors de nous, d'une façon objective : à la limite du moins, comme un ensemble de nécessités qui s'imposent à nos facultés de connaissance, à notre esprit, et auxquelles celui-ci doit s'adapter, sous peine de manquer la réalité qu'il cherche. Ces rapports réels prennent, à cause de leur réalité même et toujours à la limite, un aspect intuitif qui se substitue à la représentation du sens commun qu'il modifie d'ailleurs peu à peu, en s'insérant fort lentement en elle, et dont les approximations successives sont poursuivies par les hypothèses figuratives, alliées utiles des hypothèses logiques.

Nous allons essayer de déterminer maintenant, en passant de la forme méthodologique de la science et de sa valeur, à son contenu, dans quelles directions essentielles s'organise ce contenu. Loin de nous l'in-

tention d'analyser ce contenu. C'est l'œuvre des physiciens. Plus loin de nous encore l'idée de le rendre accessible. La seule bonne vulgarisation est aussi l'œuvre des physiciens, et il n'y a eu de bonne vulgarisation que par les plus grands d'entre eux. Non, nous cherchons à nous rendre compte des grandes directives selon lesquelles se constitue la physique, à travers les travaux nécessairement spécialisés des savants. Nous voudrions en dégager la signification philosophique, c'est-à-dire faire le point de sa valeur de *réalité* puisqu'aussi bien l'effort philosophique c'est, somme toute, la recherche du « réel entier », du réel aussi loin qu'il est possible d'aller en étendue et en profondeur ; ou, si l'on veut, la recherche de la vérité, du moins ce que nous en pouvons atteindre.

L'ouvrage que voici n'est qu'une première partie de ce travail. C'est un essai sur la signification objective de la thermodynamique et de la théorie cinétique des gaz. Objective, nous voulons dire : la contribution qu'on en peut tirer pour déterminer le contenu et la structure des idées de matière et d'objet ; — plus exactement la part qui appartient à ces chapitres de la physique dans la constitution et la signification philosophique de nos idées de matière et d'objet.

Il nous a paru que c'était par là qu'on devait, chronologiquement et logiquement, aborder, au point de vue auquel nous nous plaçons, le contenu de la physique contemporaine.

« Car, comme l'a dit le surhumain Aristote, les mêmes pensées sont venues à plusieurs reprises aux hommes suivant certaines périodes déterminées de l'univers... mais elles apparaissent et tour à tour disparaissent suivant les retours des révolutions célestes. »

(Proclus, *Prologue du commentaire sur Euclide.*)

« Cette vie, telle que tu la vis actuellement, telle

que tu l'as vécue, il faudra que tu la revives encore une fois, et une quantité innombrable de fois... L'éternel sablier de l'existence sera retourné toujours à nouveau — et toi avec lui, poussière des poussières. »

(Nietzsche, *Le Gai Savoir*, oph. 341, 1881.)

« Mais si ce sont les mêmes éléments de chaque monde qui servent, après sa destruction, à en reconstituer d'autres, il est aisé de comprendre que les mêmes combinaisons, c'est-à-dire les mêmes mondes habités par les mêmes êtres, ont dû se répéter bien des fois... Ombres des temps passés qui sembliez évanouies pour toujours dans la brume des âges et que la baguette magique de la science évoque à son gré, n'espérez pas le repos, vous êtes immortelles. »

(Dr Gustave le Bon, *L'homme et les Sociétés*, t. II, p. 420, 1881.)

« Ce que j'écris en ce moment dans un cachot du fort du Taureau, je l'ai écrit et je l'écrirai pendant l'éternité sur une table, avec une plume, sous des habits, dans des circonstances toutes semblables... L'univers se répète sans fin et piaffe sur place. L'éternité joue imperturbablement dans l'infini les mêmes représentations. »

(Auguste Blanqui, *L'Eternité par les astres*, 1871, publié en 1872.)

PRÉFACE

I

En étudiant l'histoire de la physique depuis le commencement du XIXe siècle, nous avons été frappé par ce fait : l'histoire technique, l'histoire des inventions et des découvertes ne peut se séparer de l'histoire des grandes théories. Isoler une physique pratique d'une physique spéculative n'a pas de sens historique. La distinction ne peut se faire qu'après coup, et pour des manuels à but précis, utilitaire. Mais la science physique n'est pas un ensemble de recettes. Elle permet d'établir celles-ci ; mais elle ne le permet qu'à condition d'être elle-même autre chose. Les progrès de la science physique ont été toujours commandés par les idées théoriques.

Ces idées théoriques ne sont pas elles-mêmes toutes de même aspect et de même portée. Il en est de très près de la technique ; il en est, dans ce qu'on a appelé les « grandes » théories de la physique, qui en sont au contraire très éloignées et se rapprochent beaucoup plus de ces idées qu'on qualifie communément de philosophiques. Qu'il n'y ait aucune séparation tranchée entre la science et la philosophie, c'est ce qui nous paraît manifeste. Mais il y a entre elles une distinction qui ne se laisse méconnaître par personne : Laquelle ? Ce serait une longue recherche de l'établir. Contentons-nous ici de faire remarquer que la philosophie est avant tout, réflexion sur l'activité humaine pour la comprendre : pratique, morale, sociale, reli-

gieuse, politique, économique, aussi bien qu'artistique ou intellectuelle.

Or, il n'y a pas d'activité humaine sans réflexion. Elles sont inséparables. Mais là où elles sont peut-être le plus étroitement unies, c'est dans l'activité scientifique. La science est tout entière œuvre de réflexion ; elle est au fond philosophie. Mais si pour prendre les mots dans leur acception commune, nous distinguons la partie technique de la partie philosophique de la science, nous voyons que non seulement elles sont enchevêtrées l'une dans l'autre, mais qu'elles *se commandent* l'une l'autre, et que c'est le côté philosophique lié à la partie spéculative, presque désintéressée, de la science qui l'emporte quand il s'agit de dessiner l'évolution de celle-ci et le progrès de la pensée humaine dans la connaissance des choses. « Ce sont les idées qui mènent le monde » et le monde intellectuel au moins autant que le reste.

Or, dans l'histoire de la physique du XIXe siècle, il nous semble que se sont livrées de grandes luttes d'idées qui intéressent de plus près la philosophie. Elles se sont livrées, entre beaucoup d'autres plus partielles, très consciemment chez certains savants — les plus grands — moins chez d'autres ; c'est l'éternelle histoire de Fabrice, dans la *Chartreuse de Parme* : le soldat ne voit souvent pas la manœuvre, et il n'importe pas qu'il la voie.

Le premier combat a été mené autour de l'idée de réversibilité, pierre angulaire du vieux mécanisme. Poincaré dit qu'un système purement mécanique doit pouvoir repasser une infinité de fois infiniment près des mêmes points. On ne saurait mieux définir l'idée philosophique qui sous-tend l'idée mécanique de réversibilité. C'est l'idée que les phénomènes évoluent d'une façon cyclique, c'est la loi du retour éternel, déjà aperçue par la sagesse orientale, en tout cas nettement par la philosophie grecque, avec Héraclite et avec la théorie plus ou moins astrologique de la

grande année. Elle reparaît avec toutes les spéculations de la Renaissance. Elle reste indiscutée jusqu'au milieu du siècle dernier, où brusquement elle semble incompatible avec l'expérience, dans l'interprétation du principe de Carnot par Clausius.

La seconde lutte a pour objet la vieille antinomie philosophique du continu et du discontinu, la troisième la non moins vieille opposition de l'absolu et du relatif, du repos et du mouvement.

Ces combats ne sont point sans rapports entre eux. L'idée de retour éternel, à travers l'idée de réversibilité est liée, par la théorie cinétique, à l'atomisme, à la discontinuité du réel. L'idée de la relativité du mouvement et de la négation de tout repère en repos, il ne faut pas s'en étonner, postule la continuité. Chacune de ces luttes concourt au même objectif : l'explication de l'univers matériel, l'organisation de cet univers en système. Mais elles ont été conduites pour des objectifs spéciaux. Elles se sont développées historiquement d'une façon distincte bien qu'elles aient des rapports étroits : la première par rapport aux deux autres surtout, puisqu'elle a créé une époque de la physique (dans le sens où l'on dit une époque de la nature) : l'époque énergétiste.

C'est par elle que nous commençons ici ces études sur la philosophie de la physique, sur ce qu'un profane en physique technique, mais qui se soucie des problèmes philosophiques traditionnels, peut trouver qui l'intéresse dans le développement de cette physique.

II

La méthode s'indique. L'histoire de la physique pendant le dernier cinquantenaire du XIXe siècle nous paraît précisément un « *fait privilégié* » pour l'étude du retour éternel, parce que jamais cette idée n'a été aussi clairement mise en question. La théorie énergétiste en physique, la philosophie énergétiste, ose-

rions-nous dire, nous présente un moment historique complet de ses origines à sa fin, puisqu'on peut dire, croyons-nous, que la question est, momentanément du moins, tranchée contre elle. Nous voulons chercher à quoi correspond dans la réalité l'idée de retour éternel, si elle est une exigence de l'esprit, seulement, une exigence des choses, seulement, une adaptation de l'esprit aux choses, ou enfin la double exigence de l'esprit et des choses. Non, qu'elle soit je ne sais quelle mixture des choses et de l'esprit dans une emprise réciproque ; mais une loi du réel, ce réel primordial d'où procèdent à la fois le sujet et l'objet, esprit et choses, et que nous appellerons faute de mieux l'univers du réel.

Il importe d'abord de nous mettre en garde contre toute idée systématique *à priori*, en instituant notre recherche et les enquêtes qu'elle suppose. Nous devons donc nous efforcer d'appliquer la stricte méthode historique, de façon à laisser se dégager des faits, des faits seuls, la leçon qu'il comporte. Nous voulons impartialement, objectivement noter le mouvement des idées et le mouvement technique qui le sous-tend. A cette condition seulement, les résultats de notre enquête peuvent prouver quelque chose. Il faut laisser parler les faits. La théorie de la connaissance ne peut que sortir de son histoire.

Ce n'est qu'en conclusion que nous risquerons une interprétation de cette histoire.

III

On ne trouvera donc ici qu'une étude historique de la physique à la fin du XIXe siècle — et restreinte à l'histoire des idées fondamentales — puis un essai *philosophique* sur un point de la théorie de la connaissance : la nature de la connaissance scientifique,

Le retour éternel et la philosophie de la physique

PREMIÈRE PARTIE

LA NÉGATION DU RETOUR ÉTERNEL

LIVRE PREMIER

LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

CHAPITRE PREMIER

LE PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE ET L'EXPÉRIENCE

INTRODUCTION

Le mécanisme et le retour éternel.

Depuis Galilée et Descartes, l'évolution *philosophique* de la physique jusqu'à la fin du XIXe siècle présente une remarquable simplicité : Cinétisme cartésien d'abord, puis dynamisme Newtonien, puis, au XIXe siècle, combinaison plus ou moins claire des deux doctrines, avec une prépondérance croissante de tendances qui rappellent le cinétisme. Mais sous ces trois temps, c'est le même mouvement qui se perpétue : la mathématisation de la physique dans et par le mécanisme, théorie quantitative et déterministe, sans finalité.

Une des conséquences scientifiques capitales du mécanisme, et on pourrait presque dire sa conséquence philosophique essentielle, se concrétise dans la possibilité du *retour éternel*.

L'Univers est une machine aveugle, construite de telle sorte qu'elle peut repasser une infinité de fois par les mêmes états. Son évolution est cyclique et l'orientation de cette évolution à un moment donné, ou pendant une période donnée, doit pouvoir se répéter semblablement de façon indéfinie. Autrement dit, la machine-univers est susceptible de restaurer son état initial. Mieux dit encore, il n'y a pas d'état initial, sauf celui que nous prenons arbitrairement pour origine, sur l'évolution d'un cycle. Il y a cycle et retour éternel.

La machine humaine à transformation de mouvement, du type des machines simples étudiées dans notre mécanique élémentaire, les machines à poids (dont font partie les machines hydrauliques), les seules machines qu'on savait alors construire, en un mot, les machines qui ont leur explication nécessaire et suffisante dans les lois de la mécanique, ont manifestement servi de modèle, depuis Galilée et

Descartes jusqu'à Lagrange et Laplace, pour la représentation qu'on se faisait de la machine-univers. Toutes sont cycliques, par définition même : une machine étant ce qui peut répéter un mouvement, travailler. En elles toutes, rien ne se crée, et rien ne se perd, si l'on tient compte de tous les effets de ce travail.

Certes, on sait que ces machines ne peuvent travailler éternellement. Le mouvement perpétuel d'une machine humaine est irréalisable. C'est acquis. Mais pourquoi est-il irréalisable ? Parce qu'il y a usure, imperfection, parce que surtout il y a fuite d'une partie du travail, à cause du frottement. Il y a des travaux improductifs, mais à notre point de vue humain seulement.

Idéalisons donc ces machines. Evitons toute perte, ou considérons tous les travaux, tous les effets qu'elles produisent sur le même plan et sans en rien omettre. Rendons-les inusables, comme le sont certainement les éléments derniers de la matière. Et nous avons l'univers du mécanisme, la machine-limite.

Dans le tout matériel, rien ne se perd, rien ne se crée. Où se perdrait-il quelque chose, puisque par définition l'univers est le tout de la matière. Quantités de matière, forces, mouvements, autant de totaux constants, autant de lois de « conservation » éternelle. Suspendu sans frottement et construit avec des matériaux inusables, c'est-à-dire dont l'arrangement offrirait la même résistance infinie que les atomes dont ils sont composés, selon les idées de l'époque, un pendule oscillera éternellement, remontant toujours au niveau dont il est parti. Voilà l'image d'une machine parfaite, assurant le retour éternel du nombre infini de ses cycles identiques. Compliquez sans mesure cette représentation. Vous avez le « Monde » de Descartes, celui de Newton, celui de Laplace...

Certes, l'univers peut avoir été créé (Descartes,

Galilée, Newton sont des croyants sincères). Il pourra être anéanti. Mais ces événements ne peuvent arriver que par une décision du Créateur. Celui-ci a néanmoins dans sa toute-sagesse, dans sa toute-science, dans sa toute-puissance construit la machine éternelle et parfaite. Le commencement et la fin ne se lient pas à la constitution interne de la machine. Ils lui viendront de l'extérieur et de plus haut.

Cette image foncière du système de l'univers, la critique scientifique a cru pouvoir, peu après le milieu du XIXe siècle, la mettre en doute. Elle s'est appuyée sur des découvertes, les plus considérables qu'il y ait eu entre toutes les découvertes de la physique et qui remontent à Sadi-Carnot (1824 et 1828). De grands savants, comme Duhem, Ostwald et tant d'autres, ont même cru à la fin du siècle, pouvoir la rejeter définitivement. Le principe de Carnot a paru tracer une orientation unilatérale à l'univers. Une tendance nécessaire a transformé les cycles du retour éternel en une évolution marchant constamment dans le même sens. Une représentation scalaire de l'univers a cédé la place à une représentation vectorielle. L'univers suit une route inflexible, irréversible, tandis qu'auparavant l'irréversibilité de certains phénomènes n'était qu'apparente et se trouvait finalement compensée dans une foncière réversibilité.

L'antinomie s'est posée dans toute sa force. A la mer qui malgré ses agitations superficielles garde toujours son même niveau, quand elle repasse par l'état de calme que nous prenons pour origine, s'est substitué, comme image du monde, le fleuve dans l'eau duquel on ne se baignera jamais deux fois.

Le retour éternel a paru faire place à l'évolution dirigée : au sens étymologique, à une vue finaliste de l'univers.

C'est qu'on ne peut plus concevoir celui-ci sur le modèle des machines simples, des machines qui transforment de l'énergie mécanique en travail, et pour

ainsi dire presque du travail en travail. C'était bien lorsqu'on ne connaissait en somme pas d'autre type de machines. Mais le XIXe siècle a été le siècle d'une nouvelle machine : la machine à vapeur, la machine à feu. C'est de la chaleur ici qui se transforme en travail, cette chaleur qui, dès lors, paraît de plus en plus le principal moteur de l'univers. Le monde n'est plus seulement une machine à énergie mécanique, c'est une machine à énergie thermique, une machine à feu. La loi de transformation de la chaleur en travail que Sadi-Carnot a découverte, en étudiant la machine à vapeur, doit donc être la loi suprême du monde. Et elle semble bien imposer une direction fatale à l'évolution mondiale.

Enfin parce qu'il a semblé, comme nous l'avons dit ailleurs, que le mécanisme faisait une place trop grande à l'hypothèse, aux constructions arbitraires, aux éléments cachés, aux mouvements invisibles, et qu'il généralisait au delà de la mesure, les principes de la mécanique purement rationnelle, la critique a pu rejeter, au nom de l'expérience, au nom de ce qu'on voit et touche, l'ancienne représentation de la réalité matérielle et la remplacer par une autre image : par un moyen nouveau, et, croira-t-on, plus positif, de poursuivre la mathématisation de la physique.

Il nous faut étudier les constructions qui sous-tendent cette nouvelle image, théorie plutôt qu'image, car ce qu'on désire c'est éviter les images, — si nous voulons comprendre comment elle a pu se substituer à l'autre, et apprécier avec quelle force elle a prétendu s'y substituer.

Toute cette force elle s'est flattée de la tirer de l'expérience. Les chapitres qui vont suivre, dans cette deuxième partie de notre étude, auront pour but d'apprécier le bien fondé de cette ambition. Si en grande partie, notamment en ce qui concerne le premier de ses principes, la conservation de l'énergie, ce bien fondé ne peut faire de doute, nous verrons

qu'une interpolation trop audacieuse du principe de Carnot provoquera, rendra inévitable la critique qui remettra en pleine vigueur la conception du retour éternel et l'imposera encore une fois à la physique, et à travers la physique, au moins à la théorie de la connaissance, sinon à celle du réel.

I

Coup d'œil historique sur la notion d'énergie.

Le moyen nouveau qu'on va essayer de substituer au mécanisme pour réaliser la mathématisation de la physique a reçu le nom d'énergétisme. La notion d'énergie en effet va prétendre à remplacer à elle seule, comme notion élémentaire essentielle, la notion d'étendue, de figure, de masse et de mouvement, par suite aussi d'atomes et de milieux à structure mécanique dont avait besoin l'ancien mécanisme, enfin la notion de force elle-même dont elle vise à faire évanouir les équivoques. De là, pense-t-on, une simplification sans précédent des notions élémentaires, et pourtant la même facilité à appliquer le nombre aux phénomènes physico-chimiques.

La notion d'énergie a été introduite historiquement par Leibniz qui prélude ainsi à l'énergétisme de la fin du XIXe siècle, sous des réserves capitales (N'oublions pas qu'il a toujours professé que le monde était *machine* jusque dans ses moindres parties, et *machine*, pour lui, c'est strictement *mécanisme*).

Il y prélude certainement beaucoup plus que Newton (1) ; car d'une part c'est,chez lui et chez Huyghens que l'on trouve l'expression mathématique de la conservation de l'énergie mécanique, et d'autre part c'est chez lui encore que l'on voit pour la première fois l'interprétation métaphysique qui lie cette notion d'énergie à une conception anticinétique de la réalité

(1) Quoi qu'en pense Duhem : Evolution des théories de la mécanique, fin du ch. III.

physique. La notion newtonienne de force prête à l'équivoque. Mais la notion leibnitienne d'énergie, qu'il appelle aussi force *motrice*, la terminologie n'étant pas arrêtée, mais qui mathématiquement correspond à la notion actuelle d'énergie, ne prête pas à l'équivoque : elle représente déjà chez Leibniz comme une correction philosophique des idées de Descartes et cette correction philosophique prépare toute une métaphysique qui, de parti-pris, s'oppose à celle de Descartes, en ce qui concerne la réalité matérielle.

Remarquons-le toutefois, la conception philosophique de Leibniz, comme le dynamisme des Newtoniens ne changeaient rien à la théorie mécanique des phénomènes physiques. Elles étaient une interprétation, un moyen de comprendre la réalité, qui, pour leurs auteurs, amenaient une satisfaction intellectuelle plus complète, une sorte d'approfondissement de la mécanique physique. Elles n'étaient pas un succédané de cette mécanique, encore moins quelque chose qui, dans la science technique, devait la supplanter ou s'y opposer. Leur limite avouée, c'était une harmonie complète avec cette mécanique physique. Il y avait à cela les succès remportés par le mécanisme dans l'édification de la physique. Mais la raison profonde qui permettait cette harmonie, c'est que les connaissances physiques du XVIIe et du XVIIIe siècles ne dépassaient pas le terrain de la mécanique. Pour Leibniz, comme pour Huyghens, la force vive, l'énergie actuelle, c'est l'énergie cinétique, l'énergie de mouvement. Pour Newton la force, c'est la condition du mouvement, la déterminante d'accélération. On ne connaît bien encore que les phénomènes de mouvement.

Leibniz certes pose l'énergie potentielle de « force latente », comme il l'appelle, et c'est la somme de la force vive et de la force latente, ou morte, de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique qui est constante.

Il est bien vrai que l'énergie potentielle ne se présente pas dans l'expérience comme du mouvement et c'est la méconnaissance de ce fait qu'il reproche aux atomistes ou aux cartésiens, bref aux purs cinétistes. Il n'en appelle pas moins la somme de ces deux forces (l'énergie totale des physiciens postérieurs), *force motrice.* Et par là il montre que toute force n'est concevable qu'en rapport avec du mouvement dans une théorie mécaniste.

Il est bien vrai encore que la force newtonienne, elle non plus, si on la considère en soi, n'est pas un mouvement décelable. Mais comme l'énergie potentielle de Leibniz, la force newtonienne ne se révèle que par des mouvements : c'est une *possibilité de mouvements*, rien autre. La physique de l'époque n'a pas eu l'idée de manifestations de l'énergie potentielle ou de la force, différentes du mouvement. Elles restent des virtualités d'impulsion, quantifiées rigoureusement par le mouvement qui les réalisera. Toute énergie potentielle doit devenir énergie cinétique. Et c'est par la mesure de celle-ci, seule directement expérimentable, qu'on mesure celle-là. A ce point que l'inventeur des monades, lui-même, se demandant ce que devient la force vive quand elle paraît disparaître (choc sur un corps mou) répond que les mouvements sensibles se sont transformés en mouvements moléculaires insensibles: ce qui rejoint son principe psychologique des petites perceptions. Si bien qu'on pouvait avoir métaphysiquement une représentation qualitative de la réalité, comme Leibniz, qu'on pouvait, comme certains newtoniens, rapprocher la force de la tendance, de la virtualité ; mais on ne pouvait concevoir qu'une physique technique mécaniste, qu'une *science* mécaniste.

Avec l'énergétique de la fin du XIX[e] siècle, tout change, parce qu'il y a eu dès le premier tiers du siècle un immense accroissement de nos connaissances, relatives aux modalités et aux transformations de l'énergie.

A côté des domaines de la mécanique de l'acoustique élémentaire qui n'est qu'une province de la mécanique, et de l'optique qui, à cette époque, est une province de la géométrie, se rangent les domaines, immenses par les horizons qu'ils ouvrent, de l'optique physique, des rapports de la chaleur et du travail, de l'électromagnétisme, des transformations chimiques. On peut dire que les premières lois qui sont restées les grandes lois de ces domaines se précisent dans cette période (théorie de Fresnel, lois de Coulomb, de Faraday, d'Ampère, principe de Mayer et Joule, principe de Carnot). A côté donc de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle, de la seule énergie mécanique en somme, et de leurs rapports, nous voyons se former et se préciser les notions d'énergie électrique, d'énergie magnétique, de chaleur (ou énergie thermique), d'énergie de rayonnement, d'énergie chimique, la théorie des changements d'état. L'attention du physicien est donc attirée sur ces formes de l'énergie qui ne se traduisent pas, ne se révèlent pas, immédiatement du moins, par des mouvements. Elles se substituent au mouvement et à la configuration spatiale, d'une façon latente d'abord, bientôt d'une façon de plus en plus consciente. On s'habitue à penser en termes d'énergie, et non plus en termes de mouvements et d'étendue. Le terrain est prêt, devant les difficultés qui augmentent chaque jour sous les pas des mécanistes, pour une synthèse nouvelle des phénomènes physiques. De cette synthèse le principe de la conservation de l'énergie et le principe de Carnot vont être les clefs de voûte.

II

L'énergie et la force.

Les idées de Leibniz avaient déjà une base plus expérimentale que celles de la physique newtonienne.

Elles ont bien avec elle ceci de commun, comme nous l'avons déjà noté, qu'elles ont une couleur dynamiste. A la matière inerte elle substitue un pouvoir, une capacité qui donne à l'univers matériel quelque chose qui se rapproche de l'activité et de la vie. Mais l'énergie est concrète. C'est une réalité physique, la force est, au contraire, une abstraction. Elle se présente, si on veut essayer de la comprendre, comme la réalisation d'un concept mathématique, on pourrait presque dire d'un symbole. Ce concept, ce symbole, résulte de l'analyse du mouvement, plus exactement de la variation du mouvement. Etant donné que le mouvement d'un élément réel quelconque ne peut pas varier de lui-même (principe d'inertie), il faut à toute variation de la vitesse supposer une cause extérieure à cet élément réel qui, pris isolément, forme un système clos strictement conservatif, le plus simple des systèmes clos. Cette cause, cette déterminante de l'accélération, c'est la force. C'est une notion toute conceptuelle. On la déduit, on ne la constate pas. On ne l'expérimente pas directement, mais toujours à travers le mouvement. Elle n'est guère que la notion de cause objectivée et cette notion n'est pas, à proprement parler, physique. Elle est métaphysique. Car la physique peut se faire, croit-on, sans causes. Et ce fut l'idéal de tant de savants.

La notion d'énergie, elle, est expérimentale. La première forme connue de l'énergie, la force vive, l'énergie cinétique, qui amène à sa suite l'énergie potentielle et la réversibilité de l'une dans l'autre (la constance de leur somme), est une donnée expérimentale. Galilée et Descartes la constatent à propos du travail des machines. Huyghens (théorie des forces vives) avant Leibniz, et Leibniz, la relient à des constatations expérimentales, comme nous le voyons dans le Discours de métaphysique. La chute des corps, la puissance nécessaire pour faire remonter un poids à la hauteur d'où il est tombé : voilà les expériences types

qui attirent et absorbent l'attention du physicien, à cette époque.

Bien plus tard lorsque se formule pour la transformation du travail mécanique en chaleur, et sa réciproque, une loi d'équivalence et par suite de constance, avec Joule et Mayer, ce sont les expériences célèbres du premier, les considérations de fait du second qui y amènent. L'énergie, d'ailleurs, ce n'est pas la force telle qu'on la définit en mécanique, telle qu'elle atteint toute sa précision avec Lagrange, notion mathématique et abstraite qui n'a qu'une réalité mathématique (1). L'énergie cinétique se mesure par le produit du déplacement du point d'application — sensible, visible, donnée d'expérience — du point d'application d'une force, par cette force elle-même. C'est un travail. Un travail — le résultat obtenu à l'aide d'une machine par exemple, — c'est d'abord une donnée expérimentale, et nous pouvons le mesurer par la formule de Huyghens et de Leibniz, sans faire intervenir la notion de force ; mais simplement par la considération de la masse que nous savons proportionnelle au poids — donnée sensible, donnée du sens musculaire — et de la vitesse, c'est-à-dire du déplacement par rapport au temps de cette masse, toutes choses qui sont données, mesurées par l'expérience. Et c'est de ces données mesurables et sensibles qu'on peut déduire immédiatement l'expression quantitative de la force, qu'on ne voit ni mesure directement et dont on peut tout aussi bien supposer qu'elle n'existe pas, dans une théorie purement cinétique. Mais le travail, lui, existe, c'est un fait, comme le mouvement, la configuration spatiale, le temps, le poids...

(1) Nous ne voulons pas dire par là qu'une réalité mathématique, c'est-à-dire avec intuition purement intellectuelle, soit illusoire. Cela, c'est une autre question. Nous disons simplement que la force de la mécanique rationnelle n'a pas une réalité sensible immédiate. Elle se déduit rationnellement et indirectement de certaines relations entre données sensibles.

III

Les deux premières étapes expérimentales du principe de la conservation de l'énergie.

Le travail ne serait-il même pas le fait primordial, la donnée qui logiquement doit être placée la première ? C'est à cette conclusion philosophique qu'en sont arrivés les critiques du mécanisme.

Le résultat expérimental du fonctionnement d'une machine, c'est une certaine quantité de travail. N'oublions jamais que la physique moderne est sortie tout entière de la théorie des machines, des arts mécaniques, alors que la physique scolastique restait dans le domaine des abstractions, avec la théorie des éléments. Ce qui a donc fixé l'attention, c'est le rendement de la machine. Ce fut là la donnée expérimentale qui s'imposait à l'observation, aiguillonnée par le besoin. La notion de travail est donc une donnée expérimentale visible et tangible.

Mais cette quantité de travail qui a pour but de vaincre une certaine résistance ne se produit que si on a fourni à la machine une certaine puissance. (Nous employons ici les expressions mêmes de Galilée et de Descartes). Or on observe qu'il y a toujours égalité entre les résistances vaincues et la puissance fournie. Les premières peuvent être d'ordre très divers : travail utile, frottement, freinage, etc. Mais, à mesure qu'on diminue de plus en plus les travaux inutiles ou nuisibles, on rapproche la quantité de travail utile de la quantité de puissance consommée. Expérimentalement encore, le travail fourni peut devenir puissance pour une autre machine, et le couple peut en somme fonctionner, à la limite (toutes résistances étant atténuées jusqu'à disparaître) comme une machine dont la puissance se restaurerait par une réversibilité parfaite, sans fournir d'autre travail utile il est vrai. D'où conservation de la somme de la puissance et du travail qui peuvent s'interchanger,

la machine étant l'organe de cet interchange. Et c'est la première généralisation qu'opère l'esprit, ou si l'on veut, le premier passage à la limite scientifique, ce qui revient au même.

La seconde généralisation naturelle préparée par ce fait qu'on a considéré tous les phénomènes comme des fonctionnements de machines, des mécanismes, c'est la conservation, la constance de la somme des travaux et des puissances. La loi inductive est étendue à l'univers entier, cette gigantesque machine.

L'induction qui transporte à l'univers et à tous les événements physico-chimiques de cet univers, les relations qu'on a tirées de l'observation de quelques machines simples, comporte évidemment de l'*a priori*, comme toutes les inductions (1), puisqu'elles sont toutes des dépassements de l'expérience, des interpolations ; mais le principe de la conservation de l'énergie, pas plus que la moindre loi de détail : les lois de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion dans la réflexion de la lumière, par exemple. Ce qui était sujet à caution ici c'était l'énergie potentielle et, par suite, l'énergie totale d'un système, car nous ne pouvions pas, alors, mesurer sa quantité totale.

(1) Ce qui ne veut pas dire qu'une induction soit une hypothèse bien qu'il y ait souvent voisinage entre elles. Sur le terrain de la méthodologie des sciences, une hypothèse c'est une construction *a priori* que l'expérience ne peut vérifier, dans l'état actuel des choses du moins. Une induction au contraire, c'est une proposition vérifiée par une expérience qui peut se répéter indéfiniment, sous certaines conditions bien déterminées. Le seul *a priori*, c'est ici l'interpolation qui nous fait supposer que l'expérience se répétera toujours semblablement. Exemple : Hypothèse, la théorie de l'éther de Lord Kelvin. Induction ; la constance de la vitesse de la lumière dans l'expérience de Michelson. Et dans les deux cas on vérifie des propositions, non des faits.

H. Poincaré a insisté sur ce fait, mais nous pouvions déjà mesurer les variations de l'énergie potentielle entre des limites données : un poids que l'on monte par exemple. On peut mesurer, en essayant d'atteindre comme dans toute loi physique les conditions limites (pour l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, il faut supposer une surface *parfaitement* polie), le rapport entre le travail consommé et cette augmentation d'énergie potentielle, à partir d'une quantité X qui n'importe point dans la suite du raisonnement. On peut ensuite faire tomber le poids à son niveau antérieur, mesurer le travail fourni ; et d'autre part, toujours entre certaines limites (les mêmes ici), la diminution d'énergie potentielle par rapport à la quantité X de tout à l'heure et dont la précision n'importe point davantage. Entre toutes ces limites qui constituent une expérience de laboratoire comme toutes les autres (toute expérience ne considérant les choses qu'entre des limites bien définies, on note la vérification de l'équation $dW + dV = 50$ donc de l'équation W (travail fourni) + V (énergie potentielle) = constante. Et la généralisation de la formule se fait selon le mode ordinaire, sans plus ni moins de réserves que toute induction quelle qu'elle soit : la généralisation étant toujours logiquement une universalisation, ou alors il n'y a plus de déterminisme physique, il n'y a plus ni lois scientifiques, ni science. Qu'on interpole, et par suite que toute science ne soit jamais que relative au succès de l'interpolation, donc frappée d'un coefficient d'approximation, c'est entendu encore. Mais le principe de la conservation de l'énergie à ce point de vue ne mérite jusqu'ici aucune place à part.

La physique énergétique a donc eu raison de considérer le principe de conservation de l'énergie comme une loi expérimentale et la notion d'énergie ou de travail comme une donnée de l'expérience scientifique.

IV

Troisième étape.

Le troisième temps de la généralisation étend ce résultat de l'expérience aux formes d'énergie autres que l'énergie mécanique. C'est l'œuvre du second quart du XIX[e] siècle.

Jusque-là on avait dit vaguement que lorsque l'énergie cinétique disparaît, sans qu'on puisse déceler une augmentation d'énergie potentielle capable de restaurer la même quantité d'énergie cinétique (1), par exemple dans le choc des corps mous, ou dans l'arrêt par un obstacle de la chute d'un poids, elle s'est transformée en énergie cinétique invisible (mouvements moléculaires). On avait, par certaines expériences, noté d'une façon plus précise la transformation du travail en chaleur (expériences de Rumford). Mais l'hypothèse du calorique, fluide immatériel (sans masse) indestructible comme tous les fluides newtoniens (qui participent en cela de la nature de la force), gênait les expérimentateurs. On eut alors l'idée, favorisée par les premiers balbutiements de la théorie cinétique des gaz, laquelle datait déjà des Bernouilli, de considérer la chaleur comme la manifestation sensible de la transposition, après le choc, de l'énergie cinétique globale en énergie cinétique moléculaire. Tout corps frappé, tout arrêt brusque du mouvement d'un corps contre un autre qui lui fait obstacle et qui n'est pas parfaitement élastique, laisse apparaître en effet une certaine quantité de chaleur. Mais comme il était impossible de mettre en évidence ces mouvements

(1) Exemple : quand de l'énergie cinétique est consommée et disparaît pour élever un poids à une certaine hauteur, on voit, par la suite, en laissant retomber ce poids, que cette énergie s'était transformée en énergie potentielle, dont la quantité était strictement égale à la quantité d'énergie cinétique consommée, et qui se manifeste intégralement (aux fuites près) par la chute ultérieure du poids.

moléculaires, de les mesurer, et de faire le produit des masses et des vitesses des molécules, Joule et Mayer eurent indépendamment l'un de l'autre, en expérimentateurs exacts, le génie de laisser de côté les affirmations gratuites, les hypothèses sur les mouvements cachés, et de mesurer directement la manifestation globale qui les traduit, la chaleur qui apparaît, pour établir son rapport avec l'énergie cinétique détruite, et vérifier la constance de ce rapport.

C'est ainsi que fut posé inductivement et vérifié, dans les limites des erreurs d'expérience (1), l'équivalent de la chaleur et du travail, ou équivalent mécanique de la chaleur, troisième étape dans la généralisation du principe de la conservation de l'énergie. Cette étape, c'est le passage, sur le terrain expérimental, de l'application du principe aux seuls événements mécaniques (masses, espaces parcourus, temps employés à les parcourir, vitesses et accélérations), à son application aux événements décelés par une variation de température. Au lieu de supposer des masses cachées, des accroissements ou des diminutions de vitesse invérifiables, au lieu de rester sur le terrain du cinétisme pur, par une série de transpositions imaginées et non expérimentées on compare l'effet thermique global à l'effet cinétique global.

V

Caractère expérimental de la troisième étape.

L'étape est très remarquable. Car là encore, comme aux deux étapes déjà parcourues, on demeure sur le terrain strictement expérimental. Sadi-Carnot, dans

(1) Vérification dans les limites des erreurs d'expérience ne signifie pas : vérification approximative. Cette expression signifie que les écarts, par rapport à un nombre moyen, se distribuent absolument au hasard, autour de ce nombre (d'après des théorèmes de probabilités) et en même temps s'expliquent par les conditions physiques déterminées de l'expérience.

les dernières pages qu'il a écrites, avait bien posé d'une façon très nette et très précise l'*idée* de la transformation de la chaleur et du travail contre l'hypothèse de l'indestructibilité du calorique, encore admise par lui dans l'invention du principe qui porte son nom. Il avait donc eu l'idée de conservation de l'énergie en intégrant la chaleur comme forme de l'énergie. Mais ce n'était qu'une *idée*, une vue de l'esprit, fortement motivée, et conclue par un raisonnement sûr, c'est entendu, mais sans vérification expérimentale, qu'il nous ait du moins transmise.

On a donc raison de faire remonter la loi de l'équivalence de la chaleur et du travail à Joule et à Mayer, parce que tous deux ont essayé de demander l'idée et la loi à l'expérience et de les fonder sur elle. La physique énergétiste veut éliminer tout l'*a priori*, toutes les hypothèses utilisées par le mécanisme. L'extension de la loi de conservation des systèmes mécaniques, aux systèmes à la fois mécaniques et thermiques, est une extension expérimentale, une induction fondée, comme toute induction scientifique sur l'expérience. Et tout le XIXe siècle, depuis les expériences de Joule (1843-47) (mesure au calorimètre de l'élévation de température d'une masse d'eau qui frotte sur elle-même, par suite de la chute d'un poids), a poursuivi la vérification expérimentale du principe que Mayer avait déduit en 1842 des notions expérimentales acquises sur les chaleurs spécifiques des gaz, et le rapport des quantités de chaleur nécessaires pour échauffer identiquement une même masse gazeuse, selon qu'on la maintient à pression constante ou à volume constant.

VI

Quatrième étape : l'énergie interne et l'expérience.

Dans une quatrième étape, tout aussi expérimentale que les précédentes, la physique a élaboré une

notion, corollaire direct, presque immédiat, de ce qui précède. Tout système naturel (c'est-à-dire tout corps naturel) peut être représenté par de l'énergie mécanique et de l'énergie thermique, puisqu'il a une masse, un poids et une température. Il sera donc considéré, s'il est pris isolément de tout autre, comme défini par une certaine quantité d'énergie : c'est un réservoir d'énergie. On a appelé cette quantité d'énergie, constitutive d'un système parfaitement isolé, l'*énergie interne* du système ou du corps envisagé. Le principe de la conservation de l'énergie s'énonce alors par une nouvelle généralisation qui sera capitale au point de vue des applications, et au point de vue de l'édification d'une physique énergétique. L'énergie interne d'un système en repos, c'est-à-dire où ne se manifeste aucun changement d'aucune sorte, reste invariable. Ce système, s'il est utilisé avec d'autres dans un agencement déterminé, peut céder à ces autres qui forment le système extérieur, de l'énergie, ou en absorber : la variation de l'énergie interne de notre système est alors égale à la somme de travaux extérieurs pris positivement si notre système travaille contre les forces extérieures, pendant que son énergie interne diminue, négativement si c'est le système extérieur qui travaille contre les forces de notre système et augmente son énergie. Toutes les fois que par suite de ces interactions avec les autres systèmes, notre système reprend exactement le même état (ce qui est possible), son énergie interne reprend la même valeur.

L'énergie interne de ce système est donc caractéristique de ce système. Il est vrai qu'elle n'est jamais définie qu'à une constante près, puisque nous n'observons expérimentalement que ses variations (1). Mais cela n'importe pas, comme nous l'avons vu.

(1) Du moins, dans l'état des connaissances physiques antérieures aux théories électroniques et de la relativité.

Cette notion d'énergie interne est toute voisine de la notion d'énergie potentielle, à laquelle elle se réduit si nous ne considérons le système qu'au point de vue mécanique. Mais elle marque une extension expérimentale de cette dernière notion qui, exclusivement mécanique à l'origine, englobe maintenant l'énergie thermique. Elle va d'ailleurs bientôt avoir une extension plus grande encore. Elle exprimera alors tout ce qu'il est permis d'attendre des transformations d'un système, car, prise avec la somme des travaux accomplis dans ces transformations, elle forme un total constant, dans toutes les expériences qui les mesurent.

Cette notion capitale d'*énergie interne*, fait expérimental, exprime en somme dans tout système réel « l'existence d'une réserve parfaitement déterminée d'énergie et la possibilité de mesurer ses variations » (1). Elle sera fondamentale, comme on le conçoit, pour la philosophie de l'énergétisme.

VII

L'universalisation du principe et l'expérience.

C'est encore d'une façon toute expérimentale à côté des universalisations théoriques de Grove (1842-43) et de Helmholtz (1847), qu'on a — cinquième et dernière étape — étendu le principe aux systèmes qui, à côté des énergies mécanique et calorique, laissent apparaître de l'énergie électrique ou magnétique, des transformations chimiques, etc.

Encore une fois, sous la réserve des erreurs d'expérience, des « fuites », des « effets », des « résidus » qu'on ne peut éviter totalement, mais qu'on peut toujours soit réduire progressivement, soit mesurer de plus en plus exactement, sous la réserve enfin qu'on ne peut expérimenter dans les laboratoires

(1) Leçons traduites en français par l'abbé Moigno, sous le titre de *Corrélation des forces physiques* (1851).

qu'entre certaines limites, sur certains ordres de grandeur des phénomènes, toutes réserves qui portent sur *quelque induction expérimentale que ce soit*, la physique énergétiste pouvait à bon droit se vanter de s'appuyer sur un principe d'ordre expérimental, sur une induction classique, en se fondant sur le principe de la conservation de l'énergie, et en le posant comme le premier principe de la physique théorique.

La notion d'énergie ne résulte pas de l'analyse comme la notion de force que l'on a conçue abstraitement tout entière, en analysant le mouvement concret. Non : c'est une notion sensible à l'origine. C'est dans le fonctionnement des machines concrètes qu'on l'a prise sur le vif.

Car dans toute machine il y a d'abord un *effet utile* qui pour nous est capital, puisque c'est pour cela que nous construisons les machines. La mesure de cet effet utile est capitale aussi, car c'est la mesure des avantages que nous avons obtenus. Cette mesure, c'est la quantité de travail qui nous a été présentée dans nos premières machines (levier, chariot, treuil) par le déplacement en un temps donné, sur une longueur donnée, d'un poids donné.

Ensuite il y a dans toute machine encore pour produire cet effet utile, quelque chose que l'on fournit, une cause que l'on apporte. La machine ne fonctionne pas sans une puissance qu'elle consomme. Là encore on a été conduit à mesurer la puissance consommée, de façon à établir un rapport entre cette puissance et l'effet utile. C'est cela en effet qui était intéressant pour construire, modifier, amender, bref utiliser au mieux la machine. Effet utile, puissance productrice, rapport entre les deux, c'est-à-dire rendement de la machine, voilà tout autant d'éléments concrets : expérimentaux, à ce point qu'ils furent d'abord empiriques, instinctifs (comme la marche ou la perception des distances et des temps). Or notion

d'énergie et principe de conservation ne sont que la traduction, immédiate pour la première, progressive pour la seconde, de ces expériences concrètes. Nous disons : progressive pour la seconde, car il a fallu voir d'une part que l'effet utile était toujours payé, d'autre part que l'égalité entre la puissance mise en jeu et l'effet obtenu, devait faire entrer en ligne de compte les pertes, les fuites de la machine, les effets non utiles : ce qui dans les machines simples était assez visible, à mesure qu'on affinait la machine. En tout cas l'assimilation de la résistance utilement vaincue aux résistances non utiles également vaincues s'imposait d'elle-même.

Il n'y a donc eu que des généralisations successives d'expériences à l'origine très concrètes, si concrètes qu'elles n'étaient d'aucune façon scientifique. Elles se réduisaient presque à de la perception toute pure : au sens commun, à l'empirisme le plus vulgaire. C'est là la morale qui se dégage des grandes étapes de l'histoire du principe de la conservation de l'énergie.

CHAPITRE II

LA CRITIQUE DU PRINCIPE

I

La critique de H. Poincaré.

Nous sommes obligés ici d'arrêter notre attention sur la critique à laquelle un de nos plus grands mathématiciens, physiciens et philosophes, Henri Poincaré, a soumis la notion d'énergie, son caractère expérimental et sa signification réaliste.

Cette critique a deux buts essentiels : d'une part, montrer que l'énergie n'est pas un fait, mais une abstraction, idéalisée d'abord, réalisée ensuite ; d'autre part réduire cette abstraction, quand on la presse, a « quelque chose » de très vague, qu'on ne peut qualifier que par sa constance, une constance indéfinie d'ailleurs, comme la constante à laquelle l'intégrale qui la mesure fait toujours sa place.

Que l'énergie soit une idée abstraite, comme toute idée générale, comme tout concept scientifique, c'est entendu, mais à une condition : l'abstraction dans la méthode expérimentale se distingue précisément de l'abstraction du sens commun, en ce qu'elle est réelle. Elle est un morceau d'expérience, détachée du reste, parce que les conditions dans lesquelles nous est donné le réel, la détachent d'elles-mêmes. Elle n'est pas un schéma appauvri du réel, mais une pièce né-

cessaire de ce réel, comme un rouage ou un ressort dans la machine qui n'existe elle-même que par l'articulation de ses parties : chaque partie est aussi réelle que toute autre et que l'ensemble. Cet élément réel, au sens expérimental du mot, du monde matériel, le développement de sciences physico-chimiques en précise strictement la signification. Grossièrement parlant, l'énergie, c'est la fixation bien définie dans un système donné, de ce qu'on peut attendre des effets extérieurs de ce système, de sa quantité « d'efficace » dans l'expérience, pourrait-on dire en langage scolastique. C'est le « quantum » de ses possibilités de transformation. Et de cette fixation disparaît même aujourd'hui, encore que l'exactitude eût pu s'en accommoder, l'arbitraire de la constante dans l'intégrale qui la mesure.

Voilà quel sera, en gros, en nous appuyant surtout sur les travaux ultérieurs à la critique de Poincaré, la réponse que nous nous efforcerons d'y faire.

Maintenant entrons un peu plus dans le détail.

Dans l'admirable préface qu'il a écrite pour l'impression de son cours de « Thermodynamique » (1) il remarque que : « Si l'on veut énoncer le principe dans toute sa généralité et en l'appliquant à l'Univers, on le voit pour ainsi dire s'évanouir et il ne reste plus que ceci : *Il y a quelque chose qui demeure constant* ». Il se demande alors : « Mais cela même a-t-il un sens ? »

Poincaré ne semble-t-il pas ici raisonner plutôt en mathématicien épris de logique abstraite qu'en physicien épris de réalité objective ? Suivons-le.

« Un physicien éminent me disait un jour à propos de la loi des erreurs : « Tout le monde y croit fermement parce que les mathématiciens s'imaginent que c'est un fait d'observation, et les observateurs que

(1) *Thermodynamique*, Paris, Gauthier-Villars, 1908, p. IX et *Science et hypothèse* (Flammarion, collection de Philosophie scientifique), p. 148 sq.

c'est un théorème de mathématiques ». Il en a été longtemps ainsi pour le principe de la conservation de l'énergie. Il n'en est plus de même aujourd'hui : *personne n'ignore que c'est un fait expérimental* ». Qu'on nous permette de souligner ces derniers mots que nous acceptons pleinement.

« Mais alors qui nous donne le droit d'attribuer au principe lui-même plus de généralité et plus de précision qu'aux expériences qui ont servi à le démontrer ? C'est là demander s'il est légitime... de généraliser les données empiriques... Une seule chose est certaine : si cette faculté nous était refusée, la Science ne pourrait exister... (1) » Nous ne pouvons encore que souscrire à cette opinion, puisque nous venons d'émettre des idées absolument analogues. C'est maintenant que les divergences vont commencer.

« Mais toutes propositions peuvent être généralisées d'une infinité de manières. Parmi toutes les généralisations possibles, il faut bien que nous choisissions, et nous ne pouvons choisir que la plus simple. » Nous avouons, malgré toute l'autorité du grand mathématicien, qu'ici nous ne voyons pas plusieurs manières de généraliser toute la quantité — on pourrait presque dire la quantité infinie — en tout cas, ce qui seulement importe pour légitimer l'induction, la quantité indéfinie d'expériences sur lesquelles est assise la loi de conservation de l'énergie. Lorsque nous nous efforçons de tenir compte exact des fuites, c'est-à-dire de mesurer les effets inutiles aussi bien que les effets utiles, ou lorsque nous atteignons des systèmes où les fuites s'amincissent de plus en plus, nous voyons partout, aussi bien dans les machines que dans les systèmes de mouvements envisagés au sein de la nature elle-même, puis enfin dans les systèmes qui ne sont pas exclusivement des mouvements, que ce qui sort, mesuré conformément à la définition du tra-

(1) *Id.*, p. VI.

vail, est égal à ce qui entre, mesuré conformément à la même définition.

Si rien n'est entré, mais si du travail a été produit comme lorsqu'il s'agit d'énergie potentielle qui s'actualise, la capacité ultérieure de travail du système a été diminuée d'autant jusqu'à ce qu'on y fasse entrer quelque chose de nouveau. Enfin si nous réunissons dans un même système et ce qui travaille de l'extérieur sur notre machine, et les effets extérieurs produits,nous constatons que le système s'est fermé ; rien n'est entré ni sorti. Il n'y a eu que des modifications compensatrices. Ces conclusions progressives et graduelles ont toutes été formulées comme des résultats d'expériences bien faites et bien contrôlées, qui ont étendu à mesure à des phénomènes nouveaux la proposition primitive. Et c'est bien à cela que pense H. Poincaré quand il dit du principe qu'« aujourd'hui personne n'ignore que c'est un fait expérimental ».

Mais comment pouvait-on généraliser autrement les faits en question, *sur le terrain de la physique* ? Nous avouons ici ne pas le voir. Physiquement, la loi de conservation n'est pas plus simple, ni moins simple qu'une autre généralisation : elle est la seule qui s'ajuste aux faits, à l'expérience *in concreto*. Elle n'est au fond que cela. Elle postule évidemment, comme toute induction, la répétition indéfinie de la vérification. Au sens où Jules Tannery définit l'infini mathématique : « Après un nombre entier il y en a toujours un autre », on peut dire que l'induction ici ne fait qu'affirmer, qu'*après toute vérification expérimentale, il y en a toujours une autre*. Et peut-être pour ceux qui ne veulent pas se laisser obséder par les catégories traditionnelles, et par une routine qui sépare en nature l'abstrait du concret, et le rationnel de l'expérimental, peut-être ne verra-t-on pas une très grande différence entre affirmer qu'après un nombre entier, il y en a toujours un autre, et affirmer qu'après une expérience vérifiant la loi de conservation de

l'énergie, il y en a toujours une autre. Ces deux procédés logiques, en tout cas, ne laissent pas d'avoir un air de famille : le passage à la limite, une des lois sans doute les plus profondes de notre activité intellectuelle.

II

Le passage à la limite et l'exigence scientifique.

Nous ne nous laisserons pas non plus intimider par une autre remarque de Poincaré qu'il n'y a jamais deux faits identiques : « Comme les circonstances qui ont précédé un fait quelconque ne se reproduisent jamais toutes à la fois, il faut déjà une première généralisation pour prévoir qu'un fait se renouvellera encore dès que la moindre de ces circonstances sera changée. » En effet, c'est bien là le propre même de l'induction, toujours le passage à la limite : « *toutes choses égales d'ailleurs* », telle est la formule rituelle de toute loi scientifique. Mais pour le principe de la conservation de l'énergie, il n'y a même pas à séparer ce passage à la limite de celui que nous notions tout à l'heure : le compte et la mesure des fuites. Quelles que soient les différences extérieures des expériences, nous retrouvons toujours au terme de nos mesures, quand elles sont exactes, une même *fonction — somme = constante* : à savoir l'énergie totale, la somme des énergies en jeu. C'est cette conservation même qu'impose l'expérience : rien de plus, mais rien de moins. Nous n'avons donc pas choisi la généralisation la plus simple. Elle s'est imposée d'elle-même, simple ou complexe, il n'a pas importé. Nous avons généralisé sous la contrainte de l'expérience, et sans jamais recevoir d'elle aucun démenti. Toute autre généralisation nous paraîtrait imaginative, et torturer à la fois notre esprit et l'expérience.

Mais en poursuivant la lecture de la préface de Poincaré, nous voyons bien pourquoi il a posé cette

objection. Encore une fois, il a raisonné en mathématicien, et non en physicien. Mathématiquement en effet, l'expression que la physique a donnée à la loi de conservation n'est que la plus simple d'une infinité d'expressions mathématiques qui pourraient permettre de retrouver les mêmes résultats expérimentaux. Mathématiquement encore, on peut, pour exprimer la loi d'une façon universelle, multiplier tellement le nombre n des paramètres, que nous soyons conduits à un nombre presque aussi grand d'intégrales (exactement $n - 1$) et qu'on soit bien « embarrassé » (1) de dire quelle est parmi toutes nos intégrales celle qui doit conserver le nom d'*énergie* ». Mais, réellement, expérimentalement, physiquement, la question ne se pose pas et n'a pas à être posée. Que le principe n'exprime qu'une propriété commune à tous les possibles, nous en tomberions volontiers d'accord. Mais dire : « dans l'hypothèse déterministe, il n'y a qu'un seul possible, et alors la loi n'a plus de sens (2) » ne nous semble vraiment pas une objection. Nous en appelons de Poincaré qui est très grand à Descartes qui est encore plus grand. Entre le possible et le réel (entre la mathématique et la physique) il y a la différence du tout à la partie. L'univers est un des possibles, et son « déterminisme » n'est qu'un cas du déterminisme qui enveloppe tout le possible. Ce qui est vrai du tout est vrai de la partie et a la même signification dans la partie que dans le tout. On voit bien ce que Poincaré veut dire : que le principe de conservation ne suffit jamais à déterminer une transformation physico-chimique. C'est évident. C'est une condition nécessaire à laquelle obéit toute transformation. Ce n'est pas une condition suffisante pour l'expliquer. Ce n'en est pas moins une condition nécessaire et la première de toutes.

Toute proposition physique pour être vraiment

(1) *Id.*, p. X.
(2) *Id.*, p. XII.

vraie aurait sans doute besoin que l'on tienne compte de tout l'univers. Hyperboliquement, le mouvement de ma plume, sur cette feuille de papier, d'une façon infinitésimale déplace Sirius. Mais il est certain que, physiquement, c'est-à-dire réellement, en nous mettant en face des choses, et non plus des concepts, dans l'expérience donc aussi serrée qu'on voudra, nous pouvons découper des systèmes, où nous mesurons et compensons ce qui fait qu'ils ne sont pas en toute rigueur isolés. Nous les étudions entre certaines limites bien définies où ces mesures, cette compensation, s'effectuent de façon à satisfaire la critique la plus hypercritique.

III

Légitimité expérimentale du principe.

Et alors nous trouvons à la lettre la vérification expérimentale du principe. Rappelons-nous ce que nous avons dit à l'occasion de la quantité totale réelle d'énergie dite potentielle d'un système. Rappelons-nous qu'on peut suivre le jeu d'un système entre des limites où pratiquement nous connaissons la totalité du travail des forces extérieures au système, et des forces intérieures. Et ce sont toutes les expériences de ce genre qui ont jalonné la généralisation du principe.

Aussi, pour en appeler de lui-même à lui-même, comme Poincaré nous semble mieux inspiré quand il écrit, dans les mêmes pages (1) : « Dans chaque cas particulier on voit bien ce que c'est que l'énergie et l'on en peut donner une définition au moins provisoire. » Mais n'est-ce point cela qui est le tout ?

Il ajoute alors : « mais il est impossible d'en trouver une définition générale. Si l'on veut énoncer le principe dans toute sa généralité et en l'appliquant

(1) *Id.*, p. IX.

à l'univers [tout à l'heure ne nous montrait-il pas qu'il fallait l'appliquer à tous les possibles pour lui donner un sens ?] on le voit pour ainsi dire s'évanouir et il ne reste plus que ceci : « *Il y a quelque chose qui demeure constant* ». Mais alors aussi nous devons pouvoir dire que précisément ce qui fait le tout du principe et de son importance, et sa primauté, c'est cette affirmation qu'*il y a*, sur le terrain de l'expérience, *quelque chose qui demeure constant, dans toute transformation physico-chimique, et à quoi est due cette transformation même*, et qu'on peut, entre certaines limites au moins, mesurer et évaluer. Le principe n'a pas besoin de signifier davantage pour se ranger parmi les premiers principes de la physique. Ce qu'il apporte est considérable. Il y a un *invariant de transformation*, bien défini dans chaque cas particulier, donc partout, puisque « partout », ce n'est, dans l'expérience, que la somme des cas particuliers.

La grande affaire de la science c'est de trouver des invariants, des constantes. La théorie de la relativité généralisée n'est au fond rien autre que la méthode générale qui nous permet d'écrire sous forme invariante les équations fondamentales de la physique. Les lois de la physique — et l'analyse de l'idée de loi scientifique nous amènerait aisément, sans qu'il soit besoin d'insister ici, à identifier la recherche de la loi scientifique et la recherche des constantes — sont liées aux invariants et aux constantes.

Au fond toute la critique de Poincaré qui vise en fin de compte à montrer que le principe de conservation de l'énergie est dans une certaine mesure arbitraire et hypothétique, se fonde sur deux arguments liés : le principe admet une interpolation. Cette interpolation est liée à une intégration qui, comme toute intégration, introduit une cause toute arbitraire. Mais la constante arbitraire, par cela même qu'elle reste une constante, ne gênerait en rien l'expression d'un principe de conservation. Et l'interpolation n'est

autre que l'induction justifiée par une confirmation indéfinie de l'expérience, sans aucune divergence jusqu'ici.

L'évolution ultérieure de la science physique a d'ailleurs donné tort à Poincaré sur le second point, puisque la constante arbitraire est aujourd'hui fixée. La théorie électronique et la théorie de la relativité nous conduisent toutes deux à admettre que l'énergie interne d'un système est une quantité définie et mesurable. Elle est proportionnelle à sa masse. Et la proportion est exactement fixée.

Nous avons ajouté à la formule de H. Poincaré quelques mots : Il y a quelque chose de constant *dans toute transformation et à quoi est due cette transformation même*, ou mieux : *qui assigne les conditions du changement qui s'est produit.* C'est qu'en effet la formule de Poincaré toute nue : « Il y a quelque chose de constant » est tout de même trop vague et trop large. Il y a bien d'autres constantes que l'énergie dans le domaine phénoménal. La signification véritable du principe de conservation de l'énergie, et de l'énergie elle-même, c'est qu' « on peut faire correspondre à tout changement un nombre positif ou négatif, qui résume ce qu'on peut attendre de l'effet extérieur de ce changement, quelle que soit la façon dont il se produit » (1).

Ce nombre mesure le changement d'un système, sa variation entre l'état initial et l'état final qui limitent ce changement. Si le système est resté parfaitement isolé entre ces deux états, car on peut toujours isoler un système en englobant avec lui tout ce qui pratiquement ou par un barbarisme plus précis, *mesurablement*, intervient dans le changement considéré,ou en en tenant compte, ce nombre est nul. Autrement dit, tout changement positif y a été compensé par un changement négatif mesuré par un nombre égal et

(1) Jean Perrin : *Traité de Chimie physique*, vol. I, *Les principes*, p. 93-94.

de signe contraire. C'est la formule même du principe de la conservation de l'énergie. L'énergie est donc ce qui reste constant par rapport à *tout changement* présenté par un système, *alias, dans toute transformation phénoménale*. On voit alors que — sans tenir compte de la quantité indéfinie d'expériences, de faits strictement expérimentaux, que condense, que *contient* le principe de conservation et qui ont *imposé* son extension progressive, jusqu'à son universalisation — ce principe a une signification précise, pleine et extrêmement riche. Affirmer que quelque chose demeure constant dans le devenir, ce quelque chose étant un rapport, mesurable entre des limites données — mais indéfiniment variables — de grandeurs définissables expérimentalement par le mètre, le dynamomètre, le calorimètre, le thermomètre, l'ampéremètre, le voltamètre, etc., ce n'est ni une tautologie, ni une hypothèse gratuite. C'est une des *découvertes* capitales de l'esprit scientifique, *découverte* et non intuition ou conclusion. Si notre esprit, comme on l'a dit, a besoin de postuler quelque chose de constant, nous ne verrons dans ce besoin que l'imprégnation séculaire de l'expérience qui finalement en se précisant, se complétant, s'amendant, se condensant — comme les lignes de circonvellations autour de la place assiégée — arrive à une signification, interpolée sans doute, mais tout de même jusqu'ici indéfiniment contrôlée.

IV

Apriorisme et apostériorisme.

Apostériorisme ou apriorisme, nous avouons — sans pouvoir ici y insister — ne pas donner à propos du principe grand sens à l'opposition de ces deux expressions. « Apostériorisme », sans doute, puisque c'est toute l'expérience humaine qui est derrière. Pas empirisme pourtant, car l'empirisme postule que l'ex-

périence eût pu être entièrement autre (Hume, Mill) qu'elle est contingente. Nous, nous pensons qu'elle dégage peu à peu une organisation nécessaire dont le principe en question n'est qu'une des articulations. Ce plan nécessaire est-il *a priori* ? Pas au sens innéiste pourtant, puisque l'expérience coexiste avec lui. Mais *a priori* tout de même, en ce sens qu'expérience et conscience ne font sans doute qu'un. Les lois de la première sont les principes de la seconde. La continuité de l'objet et du sujet préexiste à la coupure. Sous un certain angle, notre monde n'est-il pas créé à mesure qu'il est pensé ? ce qui donnerait peut-être un sens actuel au mythe de la réminiscence. L'énergie est une notion tirée de l'expérience, mais est et reste une notion.

LIVRE II

LA DÉGRADATION DE L'ÉNERGIE

CHAPITRE PREMIER

LE PRINCIPE DE CARNOT ET L'EXPÉRIENCE

Jusqu'ici nous n'avons fait qu'établir le caractère expérimental du principe de la conservation de l'énergie en cherchant sa signification à travers l'histoire de l'idée et sa critique. Nous n'entreprendrons l'étude de la philosophie naturelle que l'énergétisme a édifiée sur ce principe, qu'après avoir examiné, du même point de vue, l'établissement du principe de Carnot. Car cette philosophie se dégage des deux principes considérés comme indissolublement liés. Et c'est peut-être le second plus encore que le premier qui l'a déterminée.

I

Le principe de Carnot, le principe de conservation et l'expérience.

Ce qu'il y a d'assez curieux dans l'histoire des prin-

cipes relatifs à l'énergie, c'est qu'on a souvent douté de l'origine expérimentale du principe de la conservation de l'énergie, et qu'on n'a presque jamais douté du caractère expérimental du principe de Carnot. On l'a même toujours, dans la critique philosophique de la science, opposé en quelque sorte comme la revendication de l'expérience contre les efforts *a priori* de l'esprit,la limite et presque la protestation apportée par la nature contre nos prétentions constructives.

Or, s'il y a interpolation dans le principe de la conservation de l'énergie, il y a interpolation tout aussi manifeste dans celui de Carnot ; plus manifeste même, car, alors qu'aucun physicien n'a osé encore mettre en défaut le principe de la conservation de l'énergie, dans la comparaison des conséquences qu'il en tire, avec l'expérience à laquelle il l'applique, les physiciens ont assez vite mis en défaut le principe de Carnot en face de certains faits expérimentaux, comme le mouvement Brownien. Et aujourd'hui le principe de Carnot n'est plus en général considéré que comme un effet statistique. Son interpolation indéfinie est donc rigoureusement limitée, interdite par l'expérience, d'une part, par des théories émanées de l'expérience, d'autre part. C'est peut-être de lui qu'on pourrait dire qu'il est une contrainte que notre esprit a essayé d'imposer à la nature en la concevant tout entière à notre échelle : conception anthropomorphique dans toute la force du terme, puisqu'elle ne vaut qu'à l'échelle humaine, pour une portée sensible moyenne, une connaissance moyenne.

La raison de ce fait paradoxal, croyons-nous, c'est que le principe de la conservation de l'énergie pouvait rentrer dans les conceptions mécanistes traditionnelles, tandis que le principe de Carnot leur faisait échec. C'est en partant des lois de conservation qu'on a édifié les hypothèses mécanistes. La critique de la science mécaniste, et la critique de la science tout court, puisqu'alors elle était foncièrement mé-

caniste, se sont donc déclanchées sur les principes de conservation. On s'est efforcé de prouver que c'étaient des vues de l'esprit, orientées par l'expérience dans une certaine mesure, mais bien plus encore déformatrices de l'expérience. Elles étaient élaborées pour satisfaire à un besoin de la raison, le besoin d'explication, plus peut-être encore le besoin de stabilité, de permanence, bref l'idée de substance, l'idée ontologique plus ou moins déguisée sous des relations quantitatives. Le principe de Carnot ne se formule pas, du moins dans les conséquences qu'on en a tirées, par une égalité, par un principe de conservation, encore qu'une de ses formules logiquement, la première, se présente comme telle, ainsi que nous aurons l'occasion de le voir. En tout cas, ses interpolations ne se présentaient point comme telles. Aussi fut-il la grande machine de guerre de l'énergétisme contre le mécanisme, et des métaphysiques limitatrices, pour une raison ou pour une autre, de la valeur de la connaissance scientifique.

Nous nous garderons bien de renverser le point de vue et d'infirmer l'origine expérimentale du principe de Carnot. Cette origine est identique à l'origine expérimentale de toutes les lois physiques et de tous les principes qui ne sont que des lois où l'interpolation et le passage à la limite sont plus sensibles, où le travail de l'esprit, si l'on veut, est plus manifeste. Mais il reste du même ordre : la différence étant de degré et non de nature. Nous montrerons simplement, à la suite de la physique contemporaine, que tandis que le domaine d'application du principe de la conservation de l'énergie est, jusqu'à présent, universel, le domaine d'application du principe de Carnot est limité. Il ne vaut que là où l'état des phénomènes physiques considérés peut être envisagé comme une résultante de la loi des grands nombres, la moyenne d'un ensemble très complexe. Il ne vaut que là où nous sommes très loin des éléments constitutifs de

cet ensemble. Ce qui revient au même, il ne vaut que comme une très haute probabilité en présence de phénomènes produits par un très grand nombre d'événements dont l'allure individuelle ne peut être déterminée.

Mais dans ces limites d'application, il reste d'origine expérimentale. Une précision de cette expression « principe » que nous venons d'employer constamment à propos de la conservation de l'énergie, et que nous continuerons à employer à propos de tous les autres principes de la physique, importe, avant d'aller plus loin, à leur étude philosophique.

II

Qu'est-ce qu'un principe ?

On distingue d'ordinaire dans l'épistémologie physique les principes et les lois : les lois seraient les expressions immédiates des résultats de l'expérience. Les principes seraient au contraire des énonciations plus ou moins arbitraires de l'esprit. Le premier savant qui ait attiré l'attention sur ce caractère arbitraire des principes est H. Poincaré. Il avait été d'ailleurs précédé par les philosophes. Mais Poincaré considérait que cet arbitraire était au moins suggéré par l'expérience, dans la même voie que les postulats de la mathématique. C'était une extension de ses vues de mathématicien à la physique mathématique. D'ailleurs nous nous rangerons à une opinion assez voisine. Mais Duhem a renchéri sur Poincaré : « La pure logique nous laisse libre de choisir les principes comme il nous plaira ». Si l'on prend cette phrase au pied de la lettre elle est, croyons-nous, inintelligible. Alors pourquoi une formule tire — l'œil, qui surprend d'abord et qui ensuite prête, on l'a bien vu, à toutes les fantaisies de l'ignorance ? Duhem, bien entendu, la corrige immédiatement : « Il n'en résulte pas qu'il nous plaira de les choisir au hasard ; ce serait alors miracle

si les conséquences de ces principes s'accordaient avec les faits ». Nous en revenons alors à une conception fort voisine de celle de Poincaré et qui, nous le croyons bien, est maintenant adoptée par la plupart des physiciens, et par toute la philosophie des sciences, à des nuances près. Elle paraît du reste, comme toutes les choses vraies, une fois qu'on les a formulées, assez banale. Toute loi physique se précise peu à peu à partir d'expériences qualitatives assez grossières qui ouvrent en quelque sorte la voie à des hypothèses, d'abord fort vagues (1). A mesure que les expériences se précisent et s'affinent, à mesure qu'elles deviennent quantitatives et plus exactes, la formule, elle aussi, devient quantitative et exacte après quantité de tâtonnements, d'essais dont les inventeurs eux-mêmes ne nous parlent pas, parce qu'ils les ont oubliés, à mesure qu'ils les dépassaient. L'instrument mathématique est précieux dans ces essais, parce qu'il clarifie, qu'il précise, qu'il amène, dans l'effort constant que poursuit le savant, à dissocier, à épurer, à transformer l'expérience. Il la pousse vers l'abstraction, en même temps et par le même mouvement d'esprit par lequel il pousse les abstractions que lui fournit la mathématique vers le concret. Il y a là une double marche parallèle à actions et réactions constantes : mathématisation et logification de l'expérience *qui s'y prête* (c'est un fait) ; adaptation au concret des formes mathématiques qui elles aussi s'y prêtent (c'est un des ressorts de leur progrès, autre fait). Comme M. Bouasse le dit d'une façon expressive : « on trouve les principes en tâtonnant ; on essaie diverses propositions, on en déduit les conséquences et l'on voit si cela

(1) On retrouve historiquement des anticipations à presque toutes les découvertes scientifiques. Et l'on se plaint qu'une intuition spéciale soit restée de longues années stérile. Mais c'est qu'on met dans cette intuition ce que l'on a appris depuis. Telle quelle, elle est restée inutilisée, parce qu'elle était inutilisable.

colle ; on s'arrête quand ça colle tant bien que mal ». Mais ce n'est pas seulement pour les principes qu'on opère ainsi, en dehors même de la volonté consciente de l'opérateur : c'est dans toute recherche, même la plus singulière, celle qui s'enfonce le plus dans le détail. Les tâtonnements sont plus ou moins longs, et les résultats sont de plus ou moins grande envergure. C'est toute la différence. M. Bouasse l'a montré lui-même, à propos de la loi de la chute des corps de Galilée. Et quand on dit que la physique, la chimie, la chimie physique, la biologie même sont des sciences expérimentales, on ne veut pas dire autre chose. Elles se font par un travail de l'esprit qui cherche à formuler les résultats de l'expérience, de la façon la plus générale possible (c'est-à-dire qui s'ajuste le mieux à l'ensemble des faits : jusqu'à embrasser tous les faits d'un même genre, sans exception notable, comme dans les lois de la chute des corps, ou les lois de la réfraction, ou le principe de la conservation de l'énergie). L'expérience suggère peu à peu la formule et celle-ci les expériences de vérification puis ces dernières, de nouveau, s'il y a lieu, des modifications à la formule et ainsi de suite avec, chaque fois, l'effort d'interpolation, que nous avons signalé et sur lequel nous ne revenons pas. Il y a bien là, au sens propre aussi bien que vulgaire du terme, *empirisme*. Il y a là origine expérimentale et origine expérimentale pure, malgré le travail de l'esprit. Car nous imaginons que ce mot expérience n'a de sens que pour un être intelligent.

L'origine expérimentale, analogue, *mutatis mutandis*, pour les principes, les lois, les règles, voire les simples énoncés de laboratoire, comporte donc toujours de l'arbitraire et du choix : ceux de l'intelligence qui, se refusant au rôle d'enregistreur mécanique d'où jamais aucune science ne serait sortie, réagit sur les images sensibles par sa volonté de recherche, sa volonté de connaître et de comprendre. Mais cet arbi-

traire et ce choix inclus dans toute expérience, partie intégrante de l'expérience réelle, de celle qu'on fait et non du schéma abstrait que la méthodologie lui a trop souvent substitué, sont ajustés, par cela même, aux données de fait. Ils en sont, dans la réalité concrète, à peu près indiscernables, sinon en gros et d'une façon assez élastique.

III

La première étape empirique du principe de Carnot.

A ce point de vue le principe de Carnot s'est élaboré historiquement comme celui de la conservation de l'énergie, par étapes successives, et comme pour les premiers principes, par étapes expérimentales, au seul sens que ce mot puisse scientifiquement avoir.

La première étape est celle que nous devons à Sadi-Carnot dans ses « Réflexions sur la puissance motrice du feu » (1824). Les idées auxquelles il aboutit sont, par un côté, fort différentes du principe qui porte son nom. La raison en est qu'il part d'hypothèses qui ne sont plus admissibles (1), et surtout qu'il envisage les choses d'une façon beaucoup plus particulière.

Les hypothèses inadmissibles sont l'existence du calorique et l'absence d'idées claires sur la conservation de l'énergie. Bon mathématicien, il connaît pourtant le théorème de la conservation des forces vives. Mais pour la physique de son temps, le calorique se conserve comme la force vive. Et il admet séparément et isolément l'une de l'autre la conservation de ces deux entités. Il postule en somme deux et même trois principes de conservation indépendants : la conservation de la force vive, celle de la masse, celle du calorique. Il n'y a pas au début de ses réflexions l'idée de l'équivalence de la chaleur et du travail.

(1) Il les met en doute à la fin même de son mémoire ; et il exprime nos idées actuelles d'une façon exacte dans les dernières notes manuscrites que nous ayons de lui (1831).

Il y sera amené peu à peu par ses réflexions mêmes : entendez par des considérations expérimentales, car toutes ses réflexions se rattachent étroitement à celles-ci. Il ne veut que tirer la leçon des faits. Ses réflexions sont une leçon de méthode expérimentale, où il précise des idées restées fort vagues dans la physique de l'époque : à savoir les idées relatives au rendement effectif des machines à vapeur. Et c'est là le fait particulier, tout entier d'expérience, qu'il entreprend d'étudier, et d'étudier expérimentalement.

La physique de son temps n'avait là-dessus que des idées *a priori*, très lointaines des faits, puisque d'une part, elle cherchait encore le mouvement perpétuel, *productif de travail*, et d'autre part les moyens d'augmenter le rendement des machines à feu par des considérations qui étaient — c'est ce que Sadi-Carnot démontrera — non seulement arbitraires, mais radicalement fausses. De même que la physique du XVII[e] et du XVIII[e] siècle avait étudié le fonctionnement des machines à énergie mécanique, et en avait tiré les théorèmes fondamentaux relatifs au « comportement général » des phénomènes alors connus, Sadi-Carnot veut étudier le fonctionnement des machines à feu. Celles-ci, à ce moment, prennent une importance considérable dans l'industrie et se substituent, partout où on le peut, aux machines à force mécanique. L'influence de l'industrie, de la technique, se manifeste ici, comme elle s'était manifestée par la création de la physique du XVII[e] siècle sur le type de la science des machines simples et des machines à pesanteur. D'après une loi générale de l'esprit qui tente toujours d'abord d'assimiler l'inconnu au connu, aidé en cela par les idées du temps qui — pour la même raison — se représentent la chaleur, le *calorique*, comme on se représente la matière, la masse, il assimile le fonctionnement d'une machine à feu, à celui d'une machine à poids, ou d'une machine hydraulique.

De même que dans ces dernières, l'agent, la chaleur qui y remplace la masse, fournira du travail sans s'altérer. Il reste indestructible. De même encore, l'agent, tout en se conservant, n'aura produit du travail qu'en tombant d'un certain niveau à un niveau inférieur. Il y aura eu diminution de la température. La physique du XVIIIe siècle avait en effet dissocié les notions de calorique et de température. On fournit du calorique à de la glace en fusion, pour la fondre sans que la température du mélange d'eau et de glace varie, tant qu'il reste de la glace non fondue.

La chute de température, Carnot la fait voir sous *toute opération* d'une machine à vapeur. Celle-ci est essentiellement un cylindre dans lequel se meut un piston dont le mouvement produit du travail. Voyons ce qui se passe dans un coup de piston. Les opérations de ce cycle élémentaire, répétées indéfiniment, constituent à elles seules le fonctionnement de toute machine à feu. Ces opérations peuvent se ramener schématiquement à quatre temps essentiels.

D'abord de la vapeur saturée est admise dans le cylindre à une température donnée : celle de la chaudière ou source chaude (source, puisqu'elle est bien la source des quantités de chaleur fournies à la machine, source chaude parce que ces quantités de chaleur sont à ce moment à la plus haute température qui soit à considérer dans le cycle opératoire). Le piston commence une partie de sa course, à une *température à peu près constante*, celle d'une certaine masse d'eau vaporisée admise dans le cylindre.

En second lieu cette vapeur continue à faire avancer le piston une fois son admission terminée, en se refroidissant et en augmentant de volume. A ce moment, la machine théoriquement encore ne gagne ni ne perd rien de la quantité de chaleur qui lui a été apportée tout à l'heure — aux fuites près qui sont impossibles à éviter, mais qu'on peut mesurer. Seule la tempéra-

ture décroît, pendant que le volume augmente et que la machine travaille (1).

L'échappement de la masse de vapeur enfermée dans le cylindre se fait alors dans l'atmosphère ou dans le condenseur. Et le piston revient alors vers le fond du cylindre, commençant une course inverse. Théoriquement toujours, on peut considérer que ce troisième temps est une opération qui se fait à une température constante, celle du condenseur, puisque c'est celle que prend finalement la vapeur admise dans le premier temps. Cette température est la plus basse qui soit atteinte dans le cycle : c'est celle de la source froide à laquelle, comme on voit, est cédée, par la plus grande partie de la vapeur admise au début, une quantité de chaleur qu'on aura à déterminer tout à l'heure.

Nous avons en somme avec le 3e temps une opération symétrique de la première, mais de sens inverse : une transformation à température constante (isotherme) pendant laquelle de la chaleur est cédée au lieu d'être absorbée et où la température est inférieure à celle du premier temps. L'opération s'accomplit, pourrait-on dire, à un niveau plus bas.

Enfin l'échappement étant terminé par la fermeture de la communication avec le condenseur, le piston rejoint le fond du cylindre en comprimant le peu de vapeur qui y reste : celle-ci, dont le volume diminue, s'échauffe ; mais pendant ce temps la machine — toujours théoriquement et aux fuites inévitables près — ne gagne ni ne perd de chaleur. C'est une compression adiabatique, inverse de la détente adiabatique du 2e temps, mais symétrique. Ces quatre opérations terminées, elles recommencent en un nouveau cycle identique.

(1) On appelle *isotherme* la première opération, *adiabatique*, la seconde.

CHAPITRE II

LE PRINCIPE DE CARNOT ET LA LOGIQUE

I

La première étape logique : le cycle de Carnot : la machine à feu parfaite.

Nous avons déjà schématisé ce qui se passe dans la machine à vapeur, en supposant une machine parfaite et sans fuites. Les deux températures restent respectivement et rigoureusement égales à elles-mêmes pendant le 1er temps et le 3e temps : *isothermie* parfaite des deux transformations ; aucune quantité de chaleur n'est cédée ou absorbée pendant le 2e et le 4e temps : *adiabatisme* parfait des deux transformations.

Nous allons continuer cette schématisation, cette idéalisation de la machine à vapeur, en la remplaçant par un schéma plus précis, plus abstrait encore, et qui devait, dans l'esprit de Sadi-Carnot, nous donner réellement le schéma de la machine thermique parfaite, à peu près comme l'image du « gaz parfait » nous donne le schéma d'un état de la matière où les propriétés vers lesquelles tendent les gaz à mesure qu'ils s'éloignent de leur point de liquéfaction, c'est-à-dire

de l'état liquide, sont intégralement réalisées. Cette idéalisation du cycle opératoire de la machine thermique, c'est le cycle de Carnot.

D'abord nous supposerons que le cylindre est lui-même successivement chaudière et condenseur. Il ne pourra recevoir ou céder de la chaleur qu'à notre volonté et à des temps déterminés de son fonctionnement. En dehors de cela, il forme avec son piston un système rigoureusement imperméable et clos. Dans ce cylindre nous emprisonnons une fois pour toutes une masse déterminée d'un gaz (la vapeur d'eau n'est pas autre chose).

Commençons, premier temps de l'opération, par faire croître le volume de cette masse en soulevant le piston. Cette détente refroidirait notre gaz ; mais nous lui fournissons en même temps de la chaleur, empruntée à une source chaude, de façon que sa température reste constante et égale à celle de cette source, ce qui est, *à la limite*, possible, si l'opération est très lente. On a reconnu le premier temps du cycle de la machine à vapeur : la première opération isotherme.

Nous laissons ensuite se détendre notre gaz sans fournir de la chaleur. Il se refroidit en fournissant un travail qui continue à élever notre piston. C'est la première opération adiabatique.

Troisième temps : nous laissons le piston s'abaisser très lentement, en soutirant exactement, grâce à la source froide, la chaleur que produirait cette compression, de façon que notre gaz reste à la température à laquelle l'avait amené la détente précédente, et qui est celle de notre source froide. C'est la seconde opération isotherme qui se fait à une température nécessairement plus basse que la première, mais qui lui est symétrique.

Enfin nous comprimons la masse gazeuse dans le cylindre rendu de nouveau imperméable à la chaleur, pour lui restituer la température initiale : c'est la

seconde opération adiabatique, inverse de la première.

Le cycle est fermé. Et tout peut recommencer. Nous avons en somme reproduit de la façon la plus simple et la plus claire possible le va-et-vient du coup de piston de la machine à vapeur ; nous l'avons reproduit d'une façon parfaite en négligeant, grâce à notre schématisation, toutes les fuites possibles, puisque nous avons supprimé toute communication avec l'extérieur, sauf en ce qui concerne les emprunts et les cessions de chaleur nécessaires pour qu'il y ait fonctionnement périodique et travail produit, double condition sans laquelle il n'y aurait pas de machine.

Le cycle de Carnot se figure donc par deux courbes isothermes, coupées par deux courbes adiabatiques. Et l'aire comprise entre ces quatre courbes représente le travail fourni par notre machine : c'est, schématisé et idéalisé dans le sens de la perfection absolue, le diagramme classique de toute machine à vapeur.

Cette idéalisation nous permet de bien voir ce qui entre et ce qui sort, dans notre machine. Il n'y entre qu'une quantité donnée de chaleur. Il n'en sort qu'une quantité donnée de chaleur et une quantité donnée de travail.

II

Premières conséquences des idées de Carnot.

Une première conséquence évidente qui ressort du schéma de Carnot, c'est que la matière qui s'est transformée dans la machine : la masse eau-vapeur d'eau par exemple n'intervient aucunement dans le résultat obtenu. Elle n'influe pas sur l'aire qui représente le travail. Elle peut rester toujours la même, comme la matière même du cylindre et du piston. Elle est un des agencements de la machine qui supporte l'action de celle-ci, mais ne le modifie pas autrement. Que ce soit de l'huile, un gaz, de l'éther, etc., le rendement

de la machine entre les deux isothermes et les deux adiabatiques sera toujours le même. Premier point qui était capital pour Carnot, car il cherchait précisément, comme toute son époque, si l'on pouvait en changeant la substance qui alimente la chaudière, augmenter le rendement du moteur.

Deuxième point : De quoi alors dépend le rendement de notre machine ? Notre schéma montre qu'il ne dépend que de la différence des températures auxquelles se font les deux opérations isothermes. Tout le reste est symétrique. Il ne dépend donc que des différences de température entre la source chaude et la source froide. De là la conclusion de Carnot qui est la première forme du principe qui porte son nom. Le rendement d'une machine à feu dépend comme celui d'une machine à poids de la dénivellation de la quantité de chaleur fournie, c'est-à-dire de la chute de température. L'assimilation qui a inspiré Carnot, entre la machine à feu et la machine à pesanteur, si l'on peut dire, était donc pour lui théoriquement vérifiée.

Elle l'était même de tous points, par suite de l'erreur qu'il a commise, en partant de l'hypothèse du calorique. En continuant à nous placer à ce point de vue, nous voyons en effet que le poids qui tombe en travaillant, dans une machine hydraulique ou dans une horloge à poids, garde indestructible sa masse. Le travail fourni l'est par sa chute et non par une diminution de sa substance. De même dans le schéma de Carnot, la quantité de chaleur : le calorique fourni par la source chaude est intégralement absorbé par la source froide. Il est indestructible. Comme la masse, le calorique se conserve. Le travail a été fourni exclusivement par la chute de température d'une quantité indestructible de calorique. Cette erreur laissait intacte la vérité de la conclusion : à savoir que dans toute machine thermique, et par suite dans toute transformation physico-chimique où intervient du calorique, c'est-à-dire où se manifeste à un moment

donné de la chaleur, le travail produit grâce à cette chaleur, le travail produit par le calorique, dépend de la différence de température. Il n'y a pas que cela, comme nous le verrons tout à l'heure, puisqu'il y a aussi transformation d'une partie de la chaleur fournie en travail, mais cela revient au même par une heureuse coïncidence, car cette transformation dépend uniquement de la différence de température. Ce résultat est désormais acquis. Mais il resta méconnu jusqu'à Clausius, parce que précisément, à ce moment fut définitivement admis le principe de la conservation de l'énergie sous une de ses formes partielles : l'équivalence de la chaleur et du travail. Il détruisait le principe — désormais inapplicable et contradictoire — de la conservation du calorique. Aussi oublia-t-on l'œuvre de Carnot.

Mais ce qui restait du travail de Carnot, ce qui était capital pour la conception claire et distincte des transformations d'énergie, c'était que l'énergie mécanique, le travail que peut, en se transformant, fournir une quantité de chaleur donnée, dépend nécessairement d'une chute de température subie par cette quantité de chaleur : une calorie à 120 degrés peut fournir plus de travail si on la ramène à 40 degrés, qu'une calorie à 60 degrés, ramenée à la même température. Comme nous sommes nécessairement limités vers les basses températures, par les conditions naturelles dans lesquelles nous utilisons la chaleur, il en résulte que la valeur de transformation d'une calorie, l'énergie utilisable en travail qu'elle nous apporte est d'autant plus grande, plus riche, qu'elle est à une température plus haute.

Cette affirmation de la dépendance du rendement d'une machine à l'égard des températures extrêmes qui sont observées dans le cycle des transformations qui s'y accomplissent, voilà ce que l'expérience a permis d'établir, voilà la première étape de l'établissement du principe de Carnot. Comme on voit, elle

n'est valable que pour le cas où la considération des quantités de chaleur et des températures interviennent dans le cycle des opérations. Elle n'est valable que pour la machine à feu.

III

La seconde étape logique : la modification réversible.

La seconde étape va généraliser ce résultat à un système quelconque, en assimilant, partiellement au moins, toute transformation naturelle à ce qui se passe dans une machine à feu. Cette généralisation a été déjà faite, elle aussi, par Carnot, sous une forme un peu différente de sa forme ultérieure, mais qui n'enlève rien à sa généralité théorique ; au contraire.

La question qui se pose maintenant est de savoir si le schéma idéal sur lequel nous avons raisonné expérimentalement, si l'on peut dire, vaut *a fortiori* pour tout cycle de transformations quel qu'il soit, pourvu que nous ayons à y considérer à côté de l'énergie mécanique des quantités de chaleur, c'est-à-dire de l'énergie calorifique (1).

Pour les machines thermiques, il semble bien que oui, puisque nous n'avons fait que schématiser dans le sens d'une perfection absolue ce que l'expérience nous apprend du fonctionnement de ces machines. Nous avons éliminé les fuites. Il semble bien que, par là même, tout ce que Carnot conclut de son cycle doive *a fortiori* s'affirmer de toute machine. Mais on peut démontrer cet *a fortiori*. Carnot l'a fait. Il vaut mieux tenir une démonstration qu'une présomption. La démonstration de Carnot repose sur une

(1) Nous n'ignorons pas l'ambiguïté de l'expression : énergie calorifique. On peut se demander légitimement aujourd'hui si la chaleur est une forme de l'énergie, et non moins légitimement répondre que non. Mais dans la physique énergétique la considération de la forme thermique de l'énergie est au contraire nécessaire et fondamentale.

notion délicate : la notion qu'on a appelée depuis la notion de réversibilité. C'est cette notion qu'il s'agit d'analyser et de comprendre, car, en rigueur, le théorème de Carnot ne vaut que pour un cycle réversible constitué tout entier par des modifications réversibles. Et tel est bien le cycle que nous avons décrit d'après Carnot lui-même sous le nom de cycle de Carnot.

Qu'est-ce donc qu'un cycle réversible ? C'est d'abord une suite de transformations renversables ; autrement dit,c'est une suite de transformations telles que le système qui se modifie puisse revenir à son état initial. Mais c'est plus qu'une suite de transformations simplement renversables ; car il faut que le système puisse revenir à son point de départ, à son état initial en refaisant *exactement* en sens inverse le même chemin qu'il a fait d'abord dans le sens direct, en repassant par tous ses états, exactement identiques et dans le même ordre, mais inverse.. Bref une transformation réversible est une transformation qui peut en s'accouplant avec la transformation en sens contraire constituer deux phases dont l'une est exactement et entièrement l'inverse de l'autre. Voici deux poids égaux suspendus chacun à l'extrémité d'un fil que je suppose sans poids, ni torsion, ni allongement.

Ce fil passe sur une poulie qui ne frotte pas sur son support et contre laquelle je suppose qu'il ne frotte absolument pas. Je suppose la température uniforme et égale et le système isolé parfaitement de toute influence extérieure. Mes deux poids par rapport l'un à l'autre restent en équilibre dans toutes les positions. Les modifications par lesquelles je change leur position réciproque sont des modifications réversibles. Je peux aussi bien les exécuter dans un sens que dans l'autre, faire passer le système par une série de points donnés, entre une position initiale et une position finale, et le faire repasser,par une série d'états exactement inverses, de la position finale à la position initiale. Certes, dans la réalité, les modifications du

système ne seront jamais exactement réversibles, pas plus qu'il ne peut être un système exactement isolé. Et il faut faire appel à une intervention extérieure pour renverser le mouvement. C'est entendu. Mais le propre de la modification réversible, c'est comme dans toutes les lois et tous les principes physiques, d'être une limite et de réaliser virtuellement un passage à la limite. Il y a des modifications réelles où l'on peut diminuer autant qu'on veut la force nécessaire à renverser le mouvement ; celle qui nous sert en ce moment d'exemple en est une. Il y a des modifications réelles qui tendent à la limite — sans jamais l'atteindre — vers une modification réversible. Et c'est cette limite que nous considérons, que nous retenons comme dans notre conception du gaz parfait, du liquide parfaitement incompressible, du solide parfaitement dur ou parfaitement élastique, comme dans notre conception de l'inertie qui nous amène à un mouvement uniforme, lequel ne s'arrête jamais si l'on a supprimé toutes les résistances. Dans l'exemple que nous avons cité, en imprimant à l'un de nos poids un mouvement infiniment petit et infiniment lent, il suffit d'un infiniment petit pour le renverser. C'est la limite atteinte par ces infiniment petits qui nous donne la modification réversible.

En réalité celle-ci est une modification virtuelle, non réelle ; mais la considération des mouvements virtuels est essentielle à la mécanique classique : le principe des travaux virtuels la domine. Il n'y a rien là qui nous doive arrêter. Nous savons que nous pouvons assigner exactement les conditions de l'équilibre et les modalités du mouvement d'un système, en supposant des vitesses infiniment petites appliquées aux différents points de ce système, et compatibles avec les liaisons de ce système (1). Ici, pour définir

(1) Cf. Duhem, *Evol. de la Méc.*, *Rev. gén. Sc.*, 1903, p. 305-306.

« Dans le schéma mathématique par lequel la physique

la modification réversible, nous dirons que c'est une modification virtuelle, non réelle, d'un système, sous l'influence de forces infiniment petites et qui s'ac-

théorique se propose de figurer la réalité, le système matériel que l'on veut étudier est représenté par tout un cortège de grandeurs mathématiques qui en mesurent les divers éléments quantitatifs ou qui en repèrent les diverses qualités. Parmi ces grandeurs, il en est que leur définition même rend incapables d'aucune variation ; ainsi la masse d'un corps déterminé, la charge électrique d'un conducteur isolé ne sauraient varier. D'autres, au contraire, sont susceptibles de changer de valeur. Il en est dont les variations ne sont soumises à aucune restriction qui découle de leur définition : ainsi, sans contredire à la définition de l'intensité d'aimantation en un point d'un milieu magnétique, on peut attribuer à cette intensité toute grandeur et toute direction. Il en est aussi dont la capacité de varier est restreinte par certaines *conditions de liaison* qui découlent de leur définition même. Ces conditions peuvent être des inégalités : au sein d'une masse d'eau susceptible de se congeler, la masse de glace peut croître, mais elle ne peut diminuer. Ces conditions peuvent aussi être des égalités : dans un système qui renferme du carbonate de calcium, de la chaux et du gaz carbonique, il y a un rapport invariable entre la masse de chaux et la masse de gaz carbonique qui peuvent apparaître simultanément ou disparaître simultanément.

Imprimons aux grandeurs variables qui caractérisent l'état d'un système, des changements infiniment petits permis par les conditions de liaison, c'est imposer au système matériel une modification virtuelle.

C'est donc produire une modification virtuelle que de changer infiniment peu la position des corps mobiles, la figure des corps déformables ; mais c'est aussi produire une modification virtuelle que d'abaisser ou d'élever infiniment peu la température, de changer d'une proportion infiniment petite, la grandeur et la direction de l'aimantation en chaque point d'une masse de fer, de modifier infiniment peu la distribution électrique sur un corps conducteur, de fondre une masse de glace élémentaire, de congeler, de vaporiser un élément de masse d'eau, de faire subir à un composé une dissociation infiniment petite, de produire la combinaison de quantités infiniment petites de deux corps. » Duhem, *L'évolution de la mécanique*, *Rev. gén. des Sciences*, 1903, p. 305, col. 2.

Duhem ajoute : « L'emploi de ces modifications virtuelles est un artifice de raisonnement, un procédé de calcul : il

complissent d'une façon infiniment lente. Aucune modification réelle ne peut être parfaitement réversible. Mais quantité de modifications réelles tendent à la limite vers une modification réversible. Si bien que si nous supprimons virtuellement, par la pensée, les conditions restrictives qui dans la réalité empêchent les modifications d'être réversibles, si, là encore, nous tenons compte des fuites, des résistances, de certaines liaisons que nous ne pouvons entièrement anéantir, nous nous acheminons vers des modifications qui approchent de plus en plus de la réversibilité.

La modification réversible est une modification virtuelle, limite de modifications réelles. Précisons en quel sens.

Dans l'exemple que nous avons choisi : notre poids équilibré se met à descendre très lentement, aussi lentement que possible, sous l'influence d'une force aussi petite qu'on voudra. Il passe par une série de positions données. A aucun moment le sens du mouvement ne se renversera, et c'est bien ce qui distingue cette modification de la modification vraiment réversible. Notre système presque en équilibre (car s'il était rigoureusement en équilibre il serait immobile) passe par une série d'états extrêmement voisins d'états d'équilibre, mais tout de même infiniment peu déséquilibrés dans un certain sens. Renversons le sens du mouvement

est donc inutile qu'une modification virtuelle ait un sens physique. » Il nous semble qu'il y a ici une exagération verbale qui peut prêter à contre-sens. A la vérité une modification virtuelle est, par définition même, irréelle. Mais elle est une limite que réalise, si l'on peut dire,la modification idéale dans la direction de laquelle va l'expérience physique et que celle-ci réaliserait si nous étions absolument maîtres de toutes les conditions de l'expérience. Elle est l'achèvement idéal de l'expérience réelle dans son propre sens, puisqu'elle est toujours la modification infiniment petite qu'autorisent les conditions du système : virtuelle, parce que *possible.* Et cela a une signification physique, et c'est la modification contraire qui, elle, n'en a point et est irréalisable, impossible.

dans les conditions identiques. Le système repasse en sens inverse par des états infiniment voisins des premiers, infiniment voisins aussi d'états d'équilibre, mais infiniment peu déséquilibrés dans l'autre sens. Comme on voit ces deux séries d'états inverses, à mesure qu'ils se rapprochent de leurs limites, tendent toutes deux vers la même série-limite, comme le polygone circonscrit et le polygone inscrit à une même circonférence à mesure qu'on double leurs côtés, cette circonférence étant leur limite commune. La limite commune des deux séries de modifications presque réversibles en sens inverse, c'est précisément la série des modifications vraiment réversibles. Elle n'est donc mécaniquement — et c'est ainsi qu'on peut l'exprimer sous une forme mathématique particulièrement simple et riche de conséquences — elle n'est donc rien autre que *la suite des états d'équilibre infiniment voisins du système* : dans notre exemple, la suite de toutes les positions où nos deux poids s'équilibrent constamment l'un l'autre. La modification réversible est donc une suite d'états d'équilibre, limite commune de deux suites d'états inverses les uns des autres.

IV

Réversibilité logique du cycle de Carnot.

Appliquée à la thermodynamique, où l'on ne considère plus seulement des échanges d'énergie mécanique, mais aussi des échanges réciproques de chaleur en travail, la théorie se complique.

Un cycle réversible est alors une suite de modifications virtuelles, toutes réversibles, qui ramènent le système à son état initial. Dans le cycle de Carnot non seulement le système peut revenir de son état final à son état initial en retraversant en sens inverse tous les états mécaniques intermédiaires par lesquels il

a passé de celui-ci à celui-là ; mais encore le système, dans sa transformation inverse, emprunte à chacune des sources de chaleur avec lesquelles il a été en relation des quantités de chaleur égales et de signe contraire à celles qu'il leur a respectivement empruntées dans sa transformation directe. Il est aisé de voir que les transformations isothermes et les transformations adiabatiques sont des transformations réversibles, et que, de toutes les transformations où nous concevons à côté d'échange de travail et d'énergie mécanique, des échanges de chaleur, de toutes les transformations thermodynamiques, seules elles répondent à la définition de la réversibilité. Dans une transformation adiabatique, en effet, le système ne cède ni n'absorbe aucune quantité de chaleur — théoriquement du moins —. Dans une transformation isotherme — théoriquement toujours — la source et le système restent à la même température. Par conséquent le système, qu'il parcoure une adiabatique ou une isotherme, soit en sens direct, soit en sens inverse, repasse forcément par les mêmes états au point de vue thermique comme au point de vue mécanique. Il y a bien une difficulté au point de vue de la transformation isotherme, car à la même température rigoureusement, il n'y a pas d'échange de chaleur, il y a équilibre parfait, *statu quo* strict. Mais, comme on voit, cette difficulté est du même ordre que celle que nous avions rencontrée quand pour approcher progressivement de la définition de la modification réversible, nous avions d'abord considéré un système purement mécanique, celui de deux poids en équilibre sur une poulie. Elle ne doit pas nous arrêter, si précisément nous nous souvenons que la modification réversible est une limite virtuelle constituée par une série virtuelle d'*états d'équilibre*. Là encore, nous pouvons et devons supposer qu'avec une différence de température aussi petite que nous voulons, nous parviendrons d'une façon infiniment lente à céder de la chaleur à

notre système ou à lui en faire absorber, à lui faire gagner une quantité de chaleur prise positivement en sens direct et une égale quantité de chaleur prise négativement en sens inverse.

Or, le cycle de Carnot est un cycle composé comme nous l'avons vu de deux transformations isothermes et de deux transformations adiabatiques. Il est donc uniquement composé de transformations réversibles. Il réalise une suite de transformations réversibles. Il n'est valable rigoureusement que pour des transformations de ce genre. On ne peut donc en comprendre la signification exacte que si l'on a au préalable une idée claire et distincte de la modification réversible.

Il y a donc une différence capitale, essentielle, entre une modification simplement renversable et une modification réversible. Quand des quantités de chaleur entrent en jeu dans la transformation, on peut, en général, la renverser dans une machine frigorifique par exemple, ou dans une machine à vapeur fonctionnant à contre-marche. Mais il faut toujours continuer à emprunter de la chaleur à la source chaude, et en faire absorber à la source froide. Il n'y a aucun moyen réel de faire passer de la chaleur de la source froide à la source chaude. Il n'y a aucune conception virtuelle intelligible d'un processus de ce genre ; car, que vous schématisiez et idéalisiez comme vous voudrez la transformation renversable, vous êtes toujours forcé de penser que vous empruntez à une source chaude et cédez à une source froide. Nous sommes en face d'une impossibilité physique — du moins dans l'état des connaissances où s'est élaborée la thermodynamique classique et en tout cas pour tout système assez complexe, puisqu'une machine thermique ne fonctionne qu'avec une chute de température.

Revenons à notre expérience fondamentale : les transformations-types qui se passent dans le cylindre de la machine à vapeur, pendant un coup de piston. Dans cette machine, on peut renverser la vapeur,

et la faire fonctionner à contre-marche. Elle va parcourir en sens inverse le cycle des opérations que nous avons décrit. Mais elle ne va pas remonter exactement la série des états par lesquels elle a passé dans son fonctionnement direct. Elle ne refera en sens contraire que les opérations mécaniques, mais les opérations thermiques, au contraire, elle les exécutera dans le même sens.

« Puisqu'un corps ne peut céder de la chaleur à un autre dont la température est plus élevée, la chaleur abandonnée ne pourra être cédée à la source chaude. Comme il n'y a que deux sources, cette chaleur est nécessairement cédée à la source froide.

« Dans le mouvement direct de la machine », un corps « produit un travail en empruntant une quantité de chaleur Q_1 à la source chaude » et en en cédant une partie Q_2 à la source froide. Dans le mouvement inverse, « la quantité de chaleur Q_1 est cédée à la source froide, tandis que la quantité Q_2 est empruntée à la source chaude. Il n'y a donc pas inversion complète dans les échanges de chaleur ; par conséquent, en général, le cycle d'une machine thermique n'est pas réversible » (1).

Mais considérons au lieu du diagramme de la machine à vapeur, le cycle de Carnot. Ici toutes les modifications sont réversibles. Le système peut le parcourir alors exactement en sens inverse, aussi bien au point de vue mécanique qu'au point de vue thermique. « Pour les échanges de chaleur nous n'avons à considérer que les isothermes (1). Quand le point figuratif décrit l'inférieure le corps emprunte une quantité de chaleur Q_2, et cet emprunt peut être fait à la source froide puisque sa température est égale à celle que possède le corps pendant cette transformation ; on peut donc dire que le long de l'isotherme [inférieur] le corps cède une quantité de chaleur $-Q_2$ à la source

(1) Poincaré, *Thermodynamique*, 1re éd., p. 39 (1836).

froide. Pour des raisons analogues, nous pouvons dire que pendant la transformation isotherme [supérieure] le corps C emprunte une quantité de chaleur — Q_1 à la source chaude. »

« Par conséquent, lorsqu'on renverse le sens des transformations, le travail et les quantités de chaleur empruntées ou cédées à chacune des sources changent de signe [et sont rigoureusement égales à celles respectivement empruntées ou cédées pendant la marche directe]. Le cycle est donc bien réversible » (1).

La voie à contre-marche suivie le long du cycle de Carnot, et toutes les opérations mécaniques ou thermiques sont bien rigoureusement identiques, mais de sens inverse, à la voie suivie et aux opérations de la marche directe.

Ce qui avait facilité à Carnot le passage de l'étude expérimentale du coup de piston dans la machine à vapeur réelle,à sa schématisation dans le cycle de Carnot, c'est manifestement son idée de l'indestructibilité du calorique qui le forçait à considérer les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 comme rigoureusement égales, ce qui est inexact. Mais cette inexactitude l'amenait à concevoir son cycle de Carnot comme une suite de modifications, toutes par voie réversible. Et cela a joué dans le progrès de la thermodynamique un rôle capital.

V

Cycle de Carnot et rendement maximum.

On peut démontrer, en effet, et Carnot avait déjà fait cette démonstration, que la machine fonctionnant le long d'un cycle réversible est la machine à *rendement maximum*, la machine dont le rendement peut être au mieux atteint, mais ne peut jamais être dépassé : le rendement limite.

(1) Puisque dans les adiabatiques, il n'y a, par définition, aucun échange de chaleur.

Dans une modification réversible exclusivement mécanique, il est déjà facile de voir que le rendement est maximum puisque la résistance vaincue est strictement égale à la puissance : toute l'énergie du poids qui tombe est transformée dans le travail du poids qui monte virtuellement, puisqu'en réalité rien ne bouge, ou rien ne bougerait que d'une façon *infiniment* lente, ce qui revient au même. Mais enfin, si nous pouvions réaliser cette modification virtuelle du système, nous aurions un système qui à chaque instant serait en quelque sorte capable de restaurer son état initial. Le système pourrait passer continuellement, d'une façon théorique, dans une sorte de chaîne sans fin d'états d'équilibre, de l'état initial à l'état final et de celui-ci à l'état initial.

Dans une modification réversible, où du travail mécanique est produit par de la chaleur et inversement, il en est encore de même au point de vue du rendement. Il est maximum. Car si une transformation non réversible pouvait avoir, entre des limites données de température, un rendement plus grand que la transformation réversible, entre les mêmes limites, on pourrait, en l'accouplant à une machine fonctionnant par voie réversible, réaliser le mouvement perpétuel : non plus ce mouvement perpétuel à blanc, si nous osons dire, qui se borne à se restaurer, à s'entretenir incessamment, en obéissant au principe de conservation de l'énergie, mais un mouvement perpétuel bien plus fécond, puisqu'en se restaurant incessamment, il produirait en outre du travail utilisable extérieurement au système. C'est le ressort de la démonstration de Carnot. Une transformation irréversible dont le rendement dépasserait celui d'une transformation réversible entre les mêmes états initial et final serait une création de travail *ex nihilo*. Carnot s'appuyait toujours sur l'hypothèse de l'indestructibilité du calorique, dans cette démonstration, mais la conclusion n'en est pas moins juste. Et elle se dé-

montre aujourd'hui aisément à partir des vues de Clausius, par un raisonnement au fond voisin de celui de Carnot.

Ainsi la conclusion s'affirme sans équivoque ni ambiguïté. La modification réversible a une puissance de rendement supérieure à toute autre modification. C'est elle qui utilise au mieux l'énergie. Toutes les modifications réelles sont irréversibles. Toutes donc, elles utilisent moins bien l'énergie que la machine qui fonctionne selon un cycle de Carnot. La nature elle-même est une moins bonne machine que le cycle, irréel et idéalisé dans le sens du maximum de rendement, qu'est le cycle de Carnot.

VI

Le testament scientifique de Carnot.

C'est cela qui a fait l'importance capitale des conclusions que tout le XIXe siècle a tirées des vues de Carnot. A mesure que nous idéalisions la machine *purement mécanique*, à mesure que nous *fermions* et *isolions* le cycle de ses opérations, en évitant toute fuite, à mesure aussi nous nous approchions d'un mécanisme dont la puissance de rendement était égale, rigoureusement, à la puissance fournie et qui, à la limite et dans un système comme l'univers total d'où rien ne peut fuir, fonctionnait d'une façon parfaitement réversible. Fonctionnement capable de restaurer indéfiniment l'état initial. Le principe de conservation de l'énergie semblait cautionner lui-même le retour éternel : le système parfaitement clos de l'Univers était un réservoir éternel où toutes les transformations restaient indéfiniment possibles, pourvu qu'on ne leur demandât pas de création d'énergie. Sous la kaléidoscopie des transformations de l'énergie, un fond éternel, un *statu quo* éternel demeure : l'énergie interne de l'Univers, dont les appa-

rences d'incessant changement constituent, prises en totalité, un cycle fermé.

Mais avec le principe de Carnot tout change. Avec lui, nous atteignions aussi un état idéal. En concrétisant son domaine comme nous avons fait du principe de conservation, nous atteignions la modification réversible. Seulement l'univers, au total cycle fermé, ne peut plus être considéré à la limite comme un immense cycle réversible. Il faut en effet, pour qu'un cycle soit réversible, que toutes les transformations dont il est la somme le soient. Or dans l'univers il y a manifestement des modifications irréversibles. L'expérience ne nous montre même que de celles-là. Avec les cycles réels, et dans l'Univers,cycle réel, il n'y aura jamais restauration de l'état initial, mais acheminement constant vers un état de moindre puissance, une diminution de « quelque chose ».

Carnot, en 1824, partant de l'idée fausse de l'indestructibilité du calorique aboutit, en effet, à la conclusion fausse, elle aussi, d'une diminution de l'énergie, mais qui a l'avantage de bien mettre en lumière l'impossibilité du retour éternel.

Dans un cycle de Carnot parcouru en sens inverse si l'énergie mécanique du système diminue de la quantité de travail fourni, son énergie calorique augmente d'une quantité précisément égale ; l'énergie totale ne varie pas. Mais si le cycle décrit par le système est quelconque comme tous les cycles de transformations réelles, qui sont, en général, irréversibles, le coefficient de rendement étant inférieur à celui d'un cycle de Carnot, « l'énergie totale doit aller constamment en diminuant. C'est à cette idée que Carnot se ralliait, d'autres considérations que les précédentes l'y avaient conduit » (1).

Sur cet anéantissement progressif de l'énergie dans tout cycle irréversible, Carnot, dans les dernières

(1) Poincaré, *Thermodynamique*, p. 47 (§ 44).

notes que nous avons de sa main, revint d'ailleurs complètement. Il avait déjà mis en doute l'hypothèse de la conservation du calorique dans les dernières pages de son fameux mémoire (1824). En 1831 (1) il la nie purement et simplement et énonce les vues les plus actuelles. Il était prêt à constituer la thermodynamique comme elle s'est constituée avec Clausius et ses successeurs sur le principe de la conservation de l'énergie, et sur son principe qu'il aurait sans doute adapté à ce dernier. Bien plus, dépassant le point de vue purement thermodynamique pour aboutir à la théorie cinétique à laquelle se rallie de plus en plus la physique actuelle, il était prêt à nier l'énergie calorique, comme forme originale et spécifique de l'énergie, et à la considérer comme de l'énergie cinétique moléculaire : anticipation du génie, à laquelle nous ne faisons ici allusion que pour rendre à Carnot tous ses titres de gloire. Nous n'en retrouverons que bien plus tard les dernières conséquences.

« La chaleur (2), dit-il, n'est autre chose que la puissance motrice ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme. C'est un mouvement dans les particules du corps. Partout où il y a destruction de force motrice, il y a en même temps production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance motrice détruite. Réciproquement : partout où il y a destruction de chaleur, il y a destruction de puissance motrice...... On peut poser en thèse générale que la puissance motrice est une quantité invariable de la nature ; qu'elle n'est jamais, à proprement parler, produite ou détruite. A la vérité, elle change de forme, c'est-à-dire qu'elle produit tantôt un genre de mouvement, tantôt un autre, mais elle n'est jamais anéantie. »

Ces notes étant restées inédites, et la mort étant survenue (1832), ce fut à Clausius que revint l'hon-

(1) Resté inédit jusqu'en 1871.
(2) Cité par Poincaré. *Id.*, p. 54 (§ 48).

neur d'avoir dans la même direction retrouvé les idées de Carnot, mais en leur donnant la forme sur laquelle s'édifiait la doctrine de l'impossibilité du retour éternel et de la mort de l'Univers. C'est ce mouvement d'idées que l'enchaînement historique nous amène maintenant à analyser.

CHAPITRE III

LES CORRECTIONS DE CLAUSIUS

I

La mise en harmonie du principe de Carnot et du principe de conservation de l'énergie.

Entre le moment où Carnot disparaît et celui où Clausius reprend le problème, le principe de la conservation de l'énergie a été formulé d'une façon précise et en particulier le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail. On ne peut donc plus admettre comme Carnot que le calorique passe dans la machine sans se détruire et que le travail qu'il fournit est dû uniquement à sa chute. On sait que le travail de la machine à feu est une véritable transformation de l'énergie calorifique en travail mécanique.

L'hypothèse de Carnot suivant laquelle le calorique traverse la machine, comme l'eau dans une roue hydraulique, en ne la faisant fonctionner que par sa chute — et *parce qu'il y a un champ de gravitation* (1), — doit être rejetée. Le principe de Carnot qui est

(1) La machine c'est en réalité ici la roue, l'eau et la terre, le centre de gravité de la terre.

établi logiquement à la suite de cette théorie, devrait donc tomber aussi.

Ce fut la gloire de Clausius d'avoir aperçu que ce principe, dans son contenu essentiel, dans ce qu'il nous apprenait vraiment de nouveau sur l'allure de toutes les transformations physico-chimiques et sur l'impossibilité du retour éternel, ne cessait pas de s'accorder avec l'expérience. Il était donc vrai. Et toute la théorie pouvait, devait alors, se modifier très aisément pour s'accorder avec l'expérience et avec le principe de la conservation de l'énergie, qui de cette expérience est, au fond, une émanation, et une condensation.

Des vues de Carnot restait, d'accord avec l'expérience, qu'une machine thermique ne peut fonctionner qu'entre deux températures différentes. — Ce qui est encore aujourd'hui une des formules du deuxième principe de la thermodynamique : une machine thermique ne peut fonctionner qu'avec deux sources de chaleur (une source chaude et une source froide, dit-on souvent).

Reste toujours d'accord avec l'expérience que dans toute transformation physique, de la chaleur ne peut pas passer d'un corps froid sur un corps chaud, et c'est la formule que Clausius donne au principe dans sa théorie mécanique de la chaleur. La chaleur dégagée par l'eau en se congelant ne peut faire bouillir une autre quantité d'eau.

« Il est impossible de transporter directement ou indirectement de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud, à moins qu'il n'y ait en même temps destruction de travail ou transport de chaleur d'un corps chaud sur un corps froid. »

Et, pour énoncer ce principe nous n'avons besoin que de suivre expérimentalement de plus près ce qui se passe dans la machine à vapeur et dans le cycle de Carnot. Ce n'est pas expérimentalement une égale quantité de chaleur qui est empruntée à la source

chaude et cédée à la source froide. Mais, comme il y a, d'après le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail, transformation d'une certaine quantité de chaleur en travail, la quantité de chaleur cédée au condenseur est moindre que la quantité de chaleur empruntée à la chaudière. La différence, c'est précisément ce qui est transformé en travail, c'est le rendement du travail de la machine.

Mais il reste d'accord avec l'expérience, et avec la démonstration expérimentale (on peut appeler ainsi cette expérience schématisée et poussée aux limites qu'est le cycle de Carnot), que cette quantité de chaleur ne se transforme en travail que si la température de la quantité de chaleur, dont elle n'est jamais qu'une partie, s'abaisse parallèlement. Et cela depuis la température de la source chaude à laquelle elle est empruntée, jusqu'à celle de la source froide, à laquelle est cédé le reste de cette chaleur (la partie qui n'a pas été transformée en travail).

II

L'irréversibilité.

Cette interprétation de ce qui s'accomplit dans le cycle de Carnot est entièrement d'accord avec le principe de la conservation de l'énergie et avec l'expérience telle que la pousse à la limite la notion de modification réversible. Et il reste vrai, par une démonstration analogue à celle de Carnot, que toute modification irréversible a un rendement moindre. Les conclusions que nous allons voir tirées du principe de Carnot sont donc *a fortiori* vraies, de toutes les modifications naturelles, puisque celles-ci sont en général irréversibles.

Seulement, bien entendu aussi, une transformation irréversible n'est pas, comme l'avait cru d'abord Carnot, une perte, une destruction d'énergie. L'énergie, toutes fuites étant comptées, se conserve intégra-

lement. Ce qui se perd, c'est, par suite de l'abaissement de la température nécessaire, la quantité de cette énergie qui peut être utilisée ultérieurement ; c'est l'énergie utilisable et non pas l'énergie tout court.

Pourquoi ? parce qu'on ne peut pas faire passer de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud sans utiliser de l'énergie extérieure au système et que dans toute utilisation de l'énergie, il y a chute de température, abaissement de la température, refroidissement. Si bien qu'un système clos, tout en conservant rigoureusement sa quantité d'énergie interne, voit celle-ci devenir de moins en moins capable de se transformer en travail. Toute transformation en travail de son énergie abaisse sa température. Celle-ci ne peut plus se rehausser d'elle-même. Tout système — où se manifeste de l'énergie calorique, mais c'est le cas *absolument universel*, dans l'expérience — tout système donc se refroidit et ne peut de lui-même se réchauffer. Tout en conservant intégralement son énergie totale il perd de sa capacité à la transformer en travail. Il perd de son *utilisabilité*. Et par ce mot il ne faut non seulement entendre l'utilité anthropomorphique, l'utilisation dans la machine ; mais bien l'utilisabilité objective dans et par la nature : le pouvoir de transformation de tout système matériel.

III

La température absolue.

Le moment est venu d'établir les conséquences que l'on peut tirer du principe de Carnot, et que nous n'avons fait jusqu'ici qu'entrevoir, à travers les premières vues inexactes de Carnot lui-même. Nous n'avons qu'à suivre son grand interprète Clausius.

La forme définitive du principe dans toute son universalité, celle dont on peut déduire toutes les autres, est celle que lui a donnée finalement Clausius :

« Le refroidissement d'un corps froid et l'échauffement *simultané* d'un corps chaud ne peut être le résultat unique d'une combinaison quelconque de transformations. » Autrement dit : si un système isolé peut se transformer spontanément de lui-même, d'une certaine manière, dans un certain sens (celui qui amène un abaissement de température), la transformation inverse est impossible (1).

Analysons, à la lumière du principe de Clausius, le cycle de Carnot, c'est-à-dire la machine idéale ; celle qui peut donner le maximum de rendement, de toutes celles dont nous pouvons concevoir le fonctionnement entre les mêmes niveaux de température. Son coefficient de rendement sera le rapport de la différence des quantités de chaleur reçue et cédée (toujours moins grande que la première) à la quantité de chaleur reçue. La valeur de ce rapport est égale au même rapport établi non plus entre les quantités de chaleur, mais entre les températures de ces quantités de chaleur. Et finalement il dépend des deux températures extrêmes.

Si nous considérons la chaleur comme une quantité d'énergie déterminée d'après le principe d'équivalence, on voit d'abord que l'énergie mécanique ou sensible, le travail, ne sera jamais qu'une partie de la quantité d'énergie fournie par la source chaude. Il y aura toujours un résidu intransformé de chaleur, qui sera cédé à la source froide : un résidu improductif dans le cycle considéré.

Il est vrai que nous pouvons l'utiliser dans un deuxième cycle de Carnot qui aurait pour température supérieure la température de cette quantité de chaleur cédée, c'est-à-dire la température de la source froide, devenue à son tour la source chaude, et où cette température s'abaisserait alors jusqu'à celle d'une source plus froide encore.

(1) En toute rigueur, aujourd'hui, nous dirions hautement improbable. Nous verrons cela ultérieurement.

Pouvons-nous par ce biais répété autant de fois qu'on voudra, transformer en travail toute la quantité de chaleur fournie par la première source chaude à notre premier cycle considéré, fournie par la source la plus chaude dont nous puissions disposer ?

Oui, à la limite, c'est-à-dire : non dans un système expérimental quel qu'il soit, mais oui dans un système théorique qu'il nous reste à définir.

Nous avons à parler ici de la température absolue. Cette notion s'établit en toute rigueur en partant du cycle et de la fonction de Carnot, ou en partant de l'énoncé de Clausius. On peut, par suite de la dépendance du rendement d'un cycle de Carnot à l'égard des températures extrêmes entre lesquelles évolue la chaleur qu'il met en jeu, calculer à quel moment toute la quantité de chaleur absorbée au point de départ aura été transformée en travail par suite des cascades successives de température qu'on fera subir à cette quantité de chaleur. De même manière étant donné un intervalle musical entre deux notes dont on connaît le nombre de vibrations, on peut calculer le nombre de vibrations des deux notes présentant le même intervalle, une, deux, trois octaves plus basses et ainsi de suite.

Un calcul de ce genre (c'est Lord Kelvin qui le présenta pour la première fois et il conduit à une échelle thermodynamique des températures successives d'intervalles égaux) nous permet de déterminer une limite inférieure où toute la quantité de chaleur serait transformée en travail. Cela évidemment à la température la plus basse qui puisse être atteinte, puisqu'à ce moment il n'y a plus de chaleur du tout. C'est cette limite inférieure déterminée par des intervalles sans cesse décroissants qui est le 0 absolu. L'échelle de ces intervalles coïncide avec ce qu'on appelle la température normale lue sur un thermomètre à gaz parfait dont le 0 serait reporté à un point fixe qui est dans la graduation centigrade à peu près

— 273,09. L'échelle des températures absolues, la notion de température absolue se déduit donc mathématiquement de la fonction de Carnot et de l'expression qui nous donne le rendement d'un cycle de Carnot. Elle est l'inverse de la première.

Si donc nous nous arrangions pour que le cycle de Carnot ait pour température de son isotherme inférieure le 0 de notre échelle de température absolue qu'on appelle couramment le 0 absolu, toute la quantité de chaleur fournie par la source chaude au système aurait été intégralement transformée en travail. Mais c'est cela qui est impossible, car il est facile de voir que même en schématisant et en poussant à la limite, le 0 absolu reste une notion virtuelle. C'est *en toute rigueur*, la limite qui ne peut jamais être atteinte. Au fond, le 0 de l'échelle de température est physiquement l'équivalent à un repère porté à l'infini, comme l'anéantissement intégral du volume d'une masse de gaz parfait qui serait elle-même à cette température, d'après le principe du thermomètre à gaz parfait. On dira : ce n'est pas l'infini, c'est — 273,09. Mathématiquement, oui. Mais physiquement... Considérons une série de cycles de Carnot, en cascade, la température de l'isotherme inférieure devenant la température supérieure du cycle qui vient immédiatement après lui dans la série. A mesure qu'on s'approche du 0 absolu, puisqu'il faut que la source froide soit toujours de température inférieure à celle de la source chaude, nous devons considérer des écarts de température de plus en plus faibles. Par suite la chute de température deviendra de plus en plus lente. Lorsque l'écart sera infiniment petit, la transformation qui fait passer le système de l'isotherme supérieure à l'isotherme inférieure sera infiniment lente (1). La réalisation de la température du 0 absolu est donc rejetée à l'infini.

(1) Un cycle réversible peut toujours être décomposé en une somme de cycles de Carnot de cette sorte.

C'est ce qu'a montré Poincaré. Brunhes (1) expose ce fait d'une façon plus concrète « la difficulté thermodynamique qu'il y aurait à passer de 10 degrés à 5 degrés absolus, c'est-à-dire à descendre.... un échelon d'une octave, est du même ordre que celle qu'il y aurait à monter d'une octave à l'autre bout de l'échelle, et à obtenir une température double de la plus haute température réalisée jusqu'ici ».

Physiquement donc, la quantité d'énergie thermique ne pourra jamais être transformée totalement en travail, même si nous pouvions réaliser, ce qui est déjà une impossibilité réelle, des modifications absolument réversibles. Il restera dans tout système un résidu d'énergie inutilisable sous forme d'énergie-chaleur qui ne pourra jamais se transformer en travail mécanique, même avec la machine la plus parfaite, même dans l'univers considéré comme machine parfaite (2).

(1) *La dégradation de l'énergie*, p. 78.

Bouasse (*Thermodynamique*, p. 57) dit de même : « qu'il faille considérer le 0 absolu « comme un point asymptotique expérimental, est de toute évidence... Mais de là ne résulte pas l'impossibilité de s'en approcher beaucoup. L'inverse de 1 est 1, l'inverse de 0 est l'infini ; entre 1 et 0 il y a de la marge... et rien ne fixe le degré thermométrique, sinon l'arbitraire d'une définition ».

Lippmann suppose (*Thermodynamique*, p. 97) une machine fonctionnant à contre-marche, une machine réfrigérante par exemple (parfaite bien entendu), qui refroidit sa source froide. Il montre qu'à mesure qu'elle la refroidit et tend vers le 0 absolu, l'efficacité de chaque cycle opératoire de la machine est moindre : le rendement de chaque coup de piston par exemple, si nous avons affaire à une machine à gaz parfait qu'on détend et comprime alternativement). Si bien qu'il faudrait un nombre infini d'opérations pour porter la source froide au 0 absolu, et lui soutirer toute son énergie calorifique pour la transformer en travail.

(2) Nous laissons de côté ici les interprétations cinétistes, sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Nous n'exposons pour le moment que le point de vue thermodynamique parce qu'il restera celui de l'énergétisme.

Bien plus, l'Univers marche vers un état d'équilibre thermique, car une source froide se réchauffe au contact des sources plus chaudes, dans un système parfaitement isolé. Si donc le tout est un système parfaitement isolé (et comment ne le serait-il pas, puisque par définition, il n'y a rien en dehors de lui ? le néant vrai ne peut même pas absorber de la chaleur, car il ne serait plus le néant, s'il avait cette propriété d'emmagasiner à son tour de l'énergie), ce tout s'achemine vers l'équilibre thermique et à une température, si peu que ce soit, mais toujours, plus élevée que le zéro absolu.

En cet état d'équilibre, toute l'énergie du monde serait intransformable, puisque la condition d'une transformation quelconque c'est une différenciation des températures, c'est la coexistence de deux niveaux thermiques, de deux sources dont l'une est plus chaude que l'autre. Il est vrai, toujours pour la raison de la lenteur croissante des transformations mises en évidence par Poincaré, que l'équilibre final ne saurait être atteint qu'en un temps infini. Mais c'est vers cette limite quand même, sur une pente qu'il ne peut remonter, que, dans l'interprétation thermodynamique du principe de Carnot, descend graduellement le tout.

Il y a plus encore. Mettons toutes les choses au mieux ou au pire. Faisons l'hypothèse que l'Univers limité et fini, par suite d'une source froide au 0 absolu et extérieure à lui, soit capable de se refroidir par rayonnement jusqu'à ce 0 absolu, il restera toujours qu'à ce moment, l'énergie de l'Univers sera totalement intransformable. Il sera *mort*, selon l'expression de Clausius. L'Univers ne pourra donc jamais restaurer son état initial pas plus que tout autre état quel qu'il soit, même infiniment voisin de son état final, sur le terrain de la thermodynamique pure. La machine aura rendu son maximum, et elle restera inerte à tout jamais. Nous sommes à

l'extrême opposé des intentions fondamentales du cinétisme : un mouvement sans fin, un retour toujours possible, le retour éternel.

IV

L'allure épistémologique du principe.

Mais nous ne sommes pas au bout de l'analyse du principe Carnot-Clausius, et des travaux de Clausius.

Du moins, quant à présent, nous commençons à voir l'allure réelle du principe de Carnot. Il a été suggéré par l'expérience, c'est entendu. Et ses conséquences s'accordent avec toutes les expériences ; du moins dans le monde *sensible*, nous voulons dire par là le monde accessible à nos sens, à l'échelle de nos sens. N'oublions jamais — cela sera essentiel, dans la suite — cette restriction de style toutes les fois que nous parlons de ce principe.

Mais il est surtout établi par voie mathématique, théoriquement, bien plus théoriquement que le principe de la conservation de l'énergie. Pour celui-ci, on se borne à sommer des principes d'équivalence jusqu'ici toujours contrôlés par l'expérience, dans la mesure des précisions de l'expérience ; et à interpoler, comme toute loi physique, en les universalisant, les résultats de l'expérience. Avec le principe de Carnot, au contraire, en partant de concepts abstraits et virtuels, nous avons construit des fonctions qui, bien entendu, nous sont précieuses et fécondes dans la recherche expérimentale et dans l'interprétation de l'expérience, mais qui, jusqu'ici, restent des constructions abstraites. En tout cas les vues théoriques y sont plus apparentes, sinon plus effectives, que dans l'établissement du principe de conservation.

Certes l'énergie n'est bien qu'un concept mathématique, une intégrale qui nous permet de comprendre et rend intelligible l'expérience. Mais *a fortiori*, la

notion de modification réversible, qui, d'ailleurs, suppose cette première notion et nous permet, comme on va voir, d'écrire une autre intégrale, en quoi se résumera le travail de Clausius.

Si bien qu'en toute rigueur, il nous faudrait énoncer le principe de Carnot-Clausius d'une façon purement abstraite, sans aucun égard *préalable* à l'expérience, comme un postulat arbitrairement défini. Il ne serait légitimé ensuite que par la comparaison des conséquences que le calcul permet d'en déduire avec les résultats de l'expérience. Et c'est bien là qu'en arriva Clausius, c'est bien là qu'en est arrivée après lui l'école énergétique. C'est ce que nous allons faire sommairement, en posant une nouvelle notion virtuelle et abstraite, la notion d'entropie, notion toute mathématique, malgré sa portée et sa valeur réelles.

V

L'entropie.

Nous savons que dans toute transformation réversible, une certaine quantité de chaleur absorbée se change en travail, selon une proportion que fixent les températures extrêmes de la transformation. Nous pouvons donc regarder toute transformation réversible comme une fonction de cette quantité de chaleur absorbée. Nous sommes ainsi amenés mathématiquement à considérer une fonction liée à cette quantité de chaleur et à la température. Toute transformation par voie réversible pourra être représentée par la variation de cette fonction parfaitement déterminée des variables qui caractérisent le système.

C'est cette fonction qui a été appelée l'*entropie* d'un système. Elle a été définie par Clausius et, comme tout ce qui touche au principe de Carnot, en partant de la notion de transformation réversible. Ce mot entropie signifie en grec : qui fait retour sur soi-même, *involution*.

Dans une transformation réversible fermée, en effet, comme l'est le cycle de Carnot, c'est-à-dire où l'état final du système a été ramené à l'état initial, la variation d'entropie est nulle. En effet, l'état final reproduit l'état initial. Toutes les choses sont remises en état et ont bien fait retour sur elles-mêmes. Mais gardons-nous de croire que les choses se sont remises en état d'elles-mêmes. Nous ne sommes plus du tout ici en présence de ce mouvement idéal et théorique, d'ailleurs, que concevait le mécanisme, dans un système parfaitement clos qui repasserait constamment par les mêmes états : un pendule, théoriquement parfait, par exemple, oscillant dans le vide. Le cycle de Carnot est fermé, en tant que son état final est identique à son état initial. Mais il n'est ni isolé ni isolable théoriquement : il est en communication avec une source chaude et avec une source froide extérieures à lui. Il absorbe de la chaleur à une certaine température ; il en restitue une partie à la source froide, à la température de cette source. Isolé, il ne pourrait pas revenir de lui-même de l'isotherme inférieure à l'isotherme supérieure, sans absurdités, car il réaliserait le mouvement perpétuel capable de fournir du travail, de créer de l'énergie. Il serait contraire au postulat que Carnot a posé pour le concevoir. Dans tout système complètement isolé,au contraire, l'entropie subit une variation. De quel sens est-elle ? Elle est toujours du même sens, démontre Clausius. Et ce sens est tel que la fonction entropie va constamment en croissant à mesure que le système se transforme. Il n'y a plus *involution*, il y a *évolution* du système, dans toute la force du terme, puisqu'il y a direction constante dans un même sens : le système isolé a une histoire qui, contrairement à l'adage, ne se recommence pas, tant qu'il reste isolé.

Ainsi parallèlement à ce fait que jamais la chaleur ne peut se transformer intégralement en travail, dans une transformation physico-chimique sensible, paral-

lèlement à ce fait qu'une partie de l'énergie doit toujours y constituer un résidu intransformable qui se présente sous la forme d'une certaine quantité de chaleur, se déduit nécessairement cette autre conséquence que dans toute transformation par voie réversible qui ne se referme pas l'entropie croît et que par conséquent dans tout système isolé qui se transforme par voie réversible l'entropie croît encore.

Mais dans tout cela, nous n'avons considéré que des transformations par voie réversible. Nous savons que ce sont des transformations virtuelles conçues par l'esprit, à partir de l'expérience, mais qui la schématisent et l'idéalisent pour les rendre claires et distinctes à notre esprit, qui les intellectualisent et les rationalisent. Or, comment se comportent les transformations réelles qui, elles, sont toutes et toujours, quelques précautions qu'on prenne, irréversibles.

Clausius démontre que pour toute transformation irréversible l'augmentation d'entropie est encore plus grande que pour toute transformation réversible entre les mêmes états initiaux et finaux, de même et pour les mêmes raisons, au fond, que le rendement d'un cycle d'opérations irréversibles est moindre que celui d'un cycle d'opérations réversibles.

Et nous entrevoyons maintenant la signification physique réelle, et partant la signification philosophique qu'on peut donner à l'entropie.

C'est une fonction qui nous permet d'évaluer la puissance de transformation énergétique d'un système, cette puissance de transformation énergétique étant inverse de la grandeur de la fonction. L'entropie est maximum, comme dit Clausius, quand le système ne peut plus se transformer (équilibre thermique). Nous oserions dire que la grandeur, la propriété appelée entropie chiffre philosophiquement l'impuissance de transformabilité d'un système. Plus elle croît dans un système et plus est grande la valeur de transformation déjà acquise, mais, corollairement,

moindre est sa possibilité de transformation future. Tout système tend spontanément vers une moindre puissance de transformation, vers un état d'équilibre d'où, de lui-même et spontanément, il ne sortira plus.

Nous voici revenus à nos conclusions antérieures, par un nouveau biais. Nous pouvons prendre le principe de la conservation de l'entropie dans les cycles fermés de transformations réversibles,de l'accroissement de l'entropie, dans toutes les autres transformations comme une dernière expression du principe de Carnot-Clausius.

Si donc nous voulons considérer l'Univers comme un système isolé, nous voyons nécessairement que ce système pas plus que tout autre système isolé ne peut se fermer. Il ne peut revenir à son état initial. Il poursuit une évolution, toujours dans le même sens : son entropie s'accroît constamment et cela sans qu'on puisse entrevoir ni réserve, ni limitation, tant qu'on reste sur le terrain défini par Carnot et Clausius, et tant qu'on considère la chaleur comme une forme de l'énergie, *irréductible* à d'autres. Et c'est le seul point de vue auquel s'est placée la thermodynamique classique, et à sa suite l'énergétisme.

VI

Conclusions critiques sur le principe de Carnot et la fonction de Clausius.

Au fond des deux grands principes de l'énergétique, le principe de conservation et le principe de Carnot, seul, le premier est une émanation directe de toute l'expérience. Pour lui seul, l'interpolation a toujours été confirmée jusqu'ici. Si précise que soit la quantification du principe, elle est toujours vérifiée dans la mesure. Toute transformation laisse invariantes les quantités d'énergie mises en jeu par la transformation. Rien ne se crée et rien ne se perd dans la somme totale des capacités de travail d'une part, des quantités de

travail effectué d'autre part. Cette somme, faite à chaque instant, reste constante. Voilà ce qu'ont vérifié jusqu'à ce jour toutes les expériences. Donc toutes nos sensations. Aucune critique philosophique ne peut à notre avis prévaloir contre cette donnée universelle de la perception, telle qu'elle s'est construite jusqu'ici au contact des objets. A moins que cette critique ne mette elle-même cette construction en cause, c'est-à-dire la question de la réalité du monde extérieur, ou de l'objet : ce qui est d'ailleurs sa tâche.

L'énergétisme en posant le principe de la conservation de l'énergie comme fondement d'une physique qui ne veut faire aucun appel à l'hypothèse, nous semble donc sur ce point tout à fait fondée, en droit comme en fait.

C'est surtout dans l'analyse du principe de Carnot et de la fonction de Clausius qu'on peut dépister la part de l'apriorisme bien qu'on ait traditionnellement soutenu le contraire.

Que le principe de Carnot et la fonction de Clausius soient plus loin de l'expérience que le principe de conservation et que la notion d'énergie, qu'ils nécessitent pour être établis des biais mathématiques plus sinueux et plus complexes, c'est ce qui ressort de tout examen d'un traité de thermodynamique.

Pour le principe de la conservation de l'énergie, il n'y a pour ainsi dire qu'une généralisation immédiate des données expérimentales qui sont innombrables. Il n'en est guère qu'une sommation.

Le principe de Carnot, lui, part bien de l'expérience : de la machine thermique dont on a en quelque sorte généralisé le fonctionnement à tous les systèmes. Alors que le principe de conservation de l'énergie universalise le fonctionnement des machines en général, quelles qu'elles soient, des machines d'où l'on ne retire, toutes fuites compensées, que ce qu'on y a mis, et d'où l'on retire en tenant compte de toutes ces fuites tout ce qu'on y a mis, le principe de Carnot uni-

versalise le fonctionnement de la seule machine à feu. Et dans cette universalisation il est obligé de considérer la chaleur comme une forme particulière — bien particulière — de l'énergie, une forme de l'énergie qui ne se transforme pas de la même manière que les autres, dont les échanges avec les autres énergies sont assujettis aux conditions restrictives spéciales d'un résidu intransformable, d'une part, de l'accroissement de l'entropie et d'un abaissement non compensé de la température, d'autre part : conditions toutes liées entre elles. Or toutes ces affirmations, ne nous y trompons pas, ce sont des données de l'expérience. Ce ne sont peut-être pas des données de toute l'expérience : ce sont en tout cas des données de toutes les expériences qui mettent en jeu des systèmes moléculaires tant soit peu complexes.

Précisément à cause de ses attaches avec l'expérience, avec le fonctionnement de la machine à feu, et avec ce fait que dans toute transformation *sensible* de l'énergie, interviennent des quantités de chaleur, le principe a une signification réaliste. Il exprime un aspect du réel. Lui aussi c'est une condensation d'expériences.

Seulement cette condensation est moins large, comme on verra, que celle du principe de conservation de l'énergie. L'interpolation y a donc été plus osée. Elle sera dans certains cas en échec. Le principe n'est pas universel. Il est seulement général. Il a sa limite dans l'immense domaine expérimental des fluctuations. D'où il résulte que son exactitude est limitée. Nous serons amenés à conclure qu'il exprime non une loi nécessaire et absolue, mais une très haute probabilité.

Là est peut-être la raison pour laquelle, à vouloir l'établir en toute rigueur, il a fallu un détour purement abstrait. Le principe n'est plus fondé, si l'on ne conçoit pas la modification réversible.

Mais, dira-t-on, il permet des conclusions *a fortiori*

pour les modifications irréversibles. D'accord ; seulement ne l'oublions pas, « ce qu'on peut affirmer d'après lui d'une modification irréversible n'a de sens que si l'on connaît le moyen d'effectuer la [même] transformation par voie réversible ce qui permet de définir la fonction S » (1) [entropie].

Nous ne savons, nous ne pouvons intégrer la différentielle qui exprime la variation d'entropie que dans le cas d'une modification réversible.

Pour établir l'entropie d'une modification irréversible, il faut de toute nécessité recourir à la modification réversible correspondante et conclure de celle-ci à celle-là. Tel est le détour mathématique qui donne en général son sens à l'entropie dans les modifications réelles. Et c'est pourquoi la notion d'entropie a toujours été considérée comme « si prodigieusement abstraite ».

Le principe de Carnot, en toute rigueur, l'est aussi, car il ne peut être établi qu'à partir des modifications réversibles (2).

Or, une transformation réversible est une transformation virtuelle.

Dans la mécanique rationnelle, on parle bien aussi de notions virtuelles, qui sont des passages à la limite, mais l'expérience y pousse à mesure qu'on la presse en quelque sorte et qu'on élimine sa grossièreté sensible. La rationalisation, mieux l'intellectualisation

(1) Bouasse, *Thermodynamique*, 2e édit., p. 129.

(2) Voici l'expression purement technique, à laquelle, par exemple, s'arrête M. Bouasse :

« Il reste une fonction $T = f(t)$ de la température repérée au moyen d'un thermomètre quelconque, fonction que nous appellerons température absolue, telle que pour toute transformation par voie réversible, infiniment petite

$$dQ = dS\,T$$

est une différentielle exacte. dQ est la quantité de chaleur absorbée par le corps qui se transforme ; $1 : T$ est le facteur intégrant de dQ ».

Bouasse : *Thermodynamique*, 2e éd., vol. I (première partie), p. 128 (§ 95).

qu'on retrouve dans toute loi scientifique, n'est qu'un amenuisement de l'expérience.

Mais ici la rationalisation, l'intellectualisation, vont peut-être plus loin. On a modifié l'expérience avant de passer à la limite. Le cycle réversible est non seulement un passage à la limite : c'est une construction. Dans le passage à la limite, nous poussons le réel à son maximum de clarté et de distinction. Nous supposons une expérience *parfaite*, par un isolement irréel, mais qui reste strictement dans le sens des expériences à mesure qu'elles s'affinent — où plus rien ne subsiste de ce qui interfère avec le phénomène obtenu ainsi dans une sorte d'idéale pureté. Le cycle de Carnot n'est pas cela. C'est l'invention de faits irréels, mis à la place de faits réels. C'est quelque chose où l'hypothèse de l'esprit a bien plus de part : un schéma qui simplifie arbitrairement l'expérience, non plus dans le sens où celle-ci se simplifie elle-même, à mesure qu'on l'épure et l'affine, mais où l'on a grossi au contraire certaines manifestations globales de l'expérience. Simplifiée, par affinement progressif, l'expérience nous eût menés au contraire au mouvement Brownien et à la mécanique statique, comme il est arrivé par la suite.

Rien n'impose rationnellement et logiquement l'assimilation de *toutes* les modifications réelles à des modifications irréversibles au sens de Clausius. Il n'y a là qu'une induction empirique qui se fonde d'ailleurs sur *tous* les faits à notre échelle, mais qui est en contradiction avec certains faits, en deçà de notre échelle, lesquels ont bien l'air de nous faire pénétrer plus profondément encore que les premiers dans la structure du réel.

Voilà la raison profonde sans doute — et la théorie cinétique des gaz la dégagera en pleine lumière — la raison qui condamne les interpolations universelles du principe de Carnot, tentées par l'énergétisme, et qui a permis de se laisser aller à nouveau, et d'une

façon plus sûre, à l'inclination philosophique vers le retour éternel.

La mort de l'Univers, la dégradation finale de toute énergie, supposent une interpolation illégitime, parce que le principe de Carnot ne s'applique qu'aux résultats complexes et non aux éléments moléculaires. La réalité complexe se résout, pour le physicien, en éléments moléculaires, très complexes eux aussi, mais d'une complexité toute différente, et qui se présentent comme des unités simples, au regard du principe qui nous intéresse, du moins jusqu'à présent. N'oublions pas que nous sommes sur le terrain mouvant de la science ; mouvant d'ailleurs parce que progressif. C'est peut-être là seulement que la notion du progrès, s'impose d'une façon indiscutable.

Mais qu'on y prenne bien garde. Ce n'est pas parce que le principe nécessite une abstraction très poussée pour s'établir qu'il faudrait en conclure que l'anticipation de l'esprit, l'*a priori* que manifeste cette abstraction ne s'adaptent pas exactement à l'expérience, dans les limites où le principe est applicable. *Rien* n'autoriserait un pareil soupçon.

L'expérience commune est tellement loin du domaine moléculaire, celui-ci échappe si *totalement* à ses prises, que le principe de Carnot est une règle inflexible de toute cette expérience commune. Tant que nous ne nous doutons pas qu'elle n'est tout entière qu'une résultante globale, — et nous ne pouvons pas nous en douter, nous n'*avons* jamais à nous en douter, dans les circonstances communes, où nous vivons au milieu des résultantes globales, — le principe de Carnot est indiscutable et doit rester indiscuté comme traduction expérimentale *exacte* de ces apparences globales. Il est l'adaptation la plus étroite de notre esprit à ces conditions expérimentales. Son rang, avec le principe de conservation de l'énergie, et le principe de Nernst (1), de principe fondamental de la ther-

(1) Qui définit la valeur de l'entropie au 0 absolu, dans

modynamique, son titre souverain, ne peuvent être mis en question. Sa valeur technique est absolument sauve. Sur elle reposent toute notre science des transformations physico-chimiques, et partant, tout l'art de nos ingénieurs.

C'est seulement son extension philosophique qui est en jeu. L'abstraction traduit précisément ce fait, qu'il porte sur toute perception, mais non sur les conditions élémentaires de toute perception. Là il a sa limite. L'universalisation philosophique qu'on a tentée doit être arrêtée ici non par la critique technique qui laisse sauve et intacte la thermodynamique, mais par une critique philosophique qui, derrière le domaine de la thermodynamique, prend en considération celui de la théorie cinétique des gaz.

Tant que le principe de Carnot sert à régler, partant à prévoir l'orientation, le sens, des transformations physiques et chimiques, il est la sûre émanation de toutes les expériences possibles à l'occasion de ces transformations.

On ne pourrait rencontrer de difficultés que si l'on essayait de l'appliquer indûment, en deçà des systèmes complexes auxquels nous avons toujours à faire dans notre technique, aux molécules dont sont composés ces systèmes — et, avec Clausius, de décréter audacieusement pour l'avenir de l'Univers tout entier contre la possibilité d'un retour éternel, la certitude du repos éternel.

Bref, le principe de Carnot-Clausius s'applique toutes les fois que nous prenons pour « individus » les systèmes complexes que nous donne l'expérience thermodynamique, l'expérience où nous avons à faire à des transformations de chaleur en travail et réciproquement. Il ne trouverait de limite qu'au moment où nous prendrions pour « individus » les molécules,

certaines conditions restrictives, et fixe la constante arbitraire de la fonction intégrale qu'est l'entropie.

éléments — encore relatifs d'ailleurs — de ces systèmes, et où l'énergie thermique a disparu devant l'énergie mécanique. A peu près comme la science des sociétés n'a de matière que là où les unités individuelles sont les hommes, ces êtres prodigieusement complexes au point de vue physiologique, et n'a rien à voir avec les éléments cellulaires qui constituent les « individus » — encore relatifs d'ailleurs — de la physiologie.

LIVRE III

PRAGMATISME, SUBJECTIVISME ET ÉNERGÉTISME

CHAPITRE PREMIER

LE SIGNALEMENT ÉNERGÉTIQUE DES SYSTÈMES PHYSIQUES ET SON CARACTÈRE PRAGMATISTE

I

Le signalement des systèmes à l'aide des deux principes de l'énergétique.

Le principe de la conservation de l'énergie nous permet d'écrire une fonction du système qui le caractérise au point de vue *statique*. Elle désigne son contenu réel, ce qu'il renferme de réalité, d'action, partant ce qu'il est capable de mettre en œuvre. Cette fonction c'est son énergie interne. Et nous avons déjà dit que c'était en somme le signalement physico-chimique d'un système. Elle est une somme d'énergies qui se présentent sous des formes diverses et sont suscep-

tibles de s'échanger les unes les autres, d'après des rapports d'équivalence bien déterminés. Mais de ces échanges qui, d'après les lois d'équivalence et le principe de conservation sont tous possibles, seuls, quelques-uns seront réalisables. Le principe d'équivalence ne nous permet pas, à lui seul, d'écrire l'histoire du système dont il nous fournit seulement une fiche signalétique. Ce signalement statique est donc insuffisant au point de vue scientifique. Il ne suffit pas de savoir ce qu'une chose est. Il faut, et surtout, prévoir ce qu'elle deviendra, le sens de ses transformations futures, de ses possibilités de variation. Le rôle éminent du principe de Carnot est précisément de nous assurer de l'orientation des transformations des systèmes, et de nous faire prévoir celles qui, seules, parmi toutes les transformations *a priori* imaginables pourront être réalisées.

Rappelons-nous comment Clausius a analysé et mis au point le principe de Carnot pour l'accorder au principe de la conservation de l'énergie ; plus précisément, à la loi d'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique. L'application du principe de Carnot-Clausius à un système défini par son énergie interne nous permet d'écrire une nouvelle fonction signalétique de ce système : l'entropie du système. Si l'énergie interne nous donne un signalement statique, celle-ci, pourrait-on dire, donne un signalement *dynamique* (au sens large ou philosophique, et non mécanique du mot). L'équilibre initial une fois rompu, cette fonction nous permet de prévoir de quelle façon va évoluer le système, le sens de ses variations, étant admis que nous tiendrons compte de tous les échanges d'énergie du système avec l'extérieur.

L'entropie, nous l'avons déjà signalé, est une fonction abstraite, déterminée uniquement par le calcul. Il est à peu près impossible de lui faire correspondre un contenu intuitif, si ce n'est d'une façon symbolique : un symbole intuitif peut être un procédé

pratique et pédagogique commode. Il n'augmente pas notre savoir. L'idéal scientifique, l'idéal de toute connaissance est, croyons-nous, puisqu'il s'agit en fin de compte de savoir quelque chose du réel, de soutendre constamment le raisonnement par une intuition qui ne soit pas purement symbolique, mais qui ait des attaches avec le réel. Le raisonnement pur moudrait à vide.

Cette intuition d'ailleurs peut n'être pas purement sensible. Il y a des représentations conceptuelles qui ne cessent point pour cela d'être représentatives et réalistes : la réalité conceptuelle, psychologiquement, nous paraît aussi bien établie, et aussi légitimement objective que la représentation perceptive ou sensible. Elle est plus dangereuse à manier. Les illusions de l'intellect se forgent plus aisément et en plus grand nombre, se dépistent plus difficilement que celles des sens. Mais, en droit, nous devons lui donner même titre à notre créance, du point de vue psychologique, comme du point de vue logique.

Quoi qu'il en soit d'ailleurs de cette ouverture sur la théorie de la connaissance, pour revenir à l'entropie, sa signification intuitive rationnelle et non plus sensible c'est, nous semble-t-il, d'être la représentation mathématique de l'évolution d'un système. Elle croît à mesure que le système — s'il est isolé — a une histoire plus longue, un curriculum plus chargé. Le seul sens intuitif de l'entropie — et il est seulement intelligible et non sensible, — c'est qu'elle est la notion représentative de l'évolution même du système.

De ce point de vue, elle ne représente ni plus ni moins de réalité que l'énergie interne. A elles deux elles nous permettent d'exprimer toute la réalité énergétique du système.

Si bien qu'on peut écrire une loi générale du déplacement de l'équilibre, et un théorème d'équilibre qui rappelle le théorème du centre de gravité de l'ancienne

mécanique, mais qui est beaucoup plus large, et se réduit comme lui à une recherche de minimum et de maximum : *Toute transformation naturelle et spontanée tend vers une valeur maxima de l'entropie. Cette valeur caractérise l'état d'équilibre stable du système ; la valeur minima caractérisant un état d'équilibre instable.*

II

Les fonctions caractéristiques.

La représentation des phénomènes physico-chimiques à l'aide des deux principes de la thermodynamique a été poussée très loin. En particulier dans la dynamique chimique d'une part, dans la physique des changements d'état d'autre part (liquéfaction, vaporisation, etc.), elle a fourni une méthode générale dont la fécondité est loin d'être épuisée. Sans cette représentation nous n'en serions qu'à des règles purement qualitatives, tandis que nous sommes en face de la plus remarquable représentation quantitative du domaine physico-chimique, plus spécialement du domaine de la chimie physique.

Cette représentation revient à former certaines fonctions qui nous permettent de repérer et de prévoir l'avenir d'un système.

Ces fonctions s'appuient toujours sur le théorème de Clausius, elles n'envisagent par conséquent que les transformations par voie réversible. Elles ne s'appliquent aux autres systèmes (qui sont les systèmes réels) que par un biais en substituant à la transformation réelle la transformation réversible par laquelle on passe du même état initial au même état final : ce qui permet de négliger le chemin qui mène du premier de ces états à l'autre, c'est-à-dire les modalités de la transformation, puisqu'une transformation réversible ne dépend que de ces deux états. Bien entendu, il faut que l'état initial et l'état final soient des états d'équilibre, ce qui est aussi le cas général, car on peut d'or-

dinaire diviser un système en portions qui, par un isolement brusque du reste du système, seront en état d'équilibre.

La formation de ces fonctions est due à Massieu et elles portent son nom. Si l'on définit l'état d'un système physiquement homogène, par sa température absolue, et par son volume, on peut déduire de cette fonction à deux variables indépendantes les trois fonctions du système relatives à la pression, à son énergie interne et à son entropie. Si on le définit par sa température absolue, toujours, mais cette fois par sa pression, on peut déduire alors de cette fonction les fonctions relatives à son volume, à son énergie interne et à son entropie. D'ailleurs on peut généraliser pour un système quelconque, à nombre de variables quelconques (et non plus seulement deux) les fonctions de Massieu. Toutes les formes d'énergie peuvent donc entrer dans leur expression, en convenant d'appeler *forces* agissant sur le système toutes les quantités telles que leur produit par la variation de la variable qui leur correspond représente un travail ou une énergie, *autre que l'énergie calorifique.* Cette dernière restriction est capitale. Elle montre que les fonctions de Massieu, comme toute l'énergétique, que nous avons analysée jusqu'ici, a pour postulat fondamental le rôle spécifique de l'énergie calorifique.

Ces deux fonctions sont appelées les *fonctions caractéristiques.* Cette dénomination technique est suffisamment éloquente par elle-même. Les fonctions caractérisent en effet le système, dans ses rapports avec les forces extérieures, et permettent de prévoir son avenir, par rapport à ces forces. Elles sont la condensation de toute l'histoire d'un système. Et c'est un des plus grands moyens à la fois de connaissance, de prévision et d'utilisation que l'énergétique ait apportés à la science.

Avec la première fonction, nous pouvons conclure

qu'à température constante, la variation de telle des variables indépendantes données produira une transformation qui absorbera ou dégagera de la chaleur, selon que la force extérieure correspondante décroîtra ou croîtra avec la température. Et de la seconde fonction, nous pouvons déduire qu'à température constante, une modification d'une des forces extérieures données déterminera une absorption ou un dégagement de chaleur selon que la variable correspondante croîtra ou décroîtra avec la température (1).

Ces deux fonctions ont-elles un sens physique ? ou sont-elles simplement une expression mathématique, une fiche signalétique qui permet de repérer l'histoire du système. Telles quelles, elles n'apparaissent que comme un formulaire conventionnel.

Nous avons dit que les conventions et réserves qui conditionnent leur application sont les mêmes que les conventions et réserves qui conditionnent l'application aux systèmes réels de la fonction de Clausius, donc du principe de Carnot. Elles portent en elles le même arbitraire. Mais sous les mêmes conditions aussi, leur application s'étend aux systèmes réels pour lesquels elles constituent le moyen ordinaire d'interprétation, car « toutes les formules de la thermodynamique peuvent s'écrire de manière (2) à ne plus renfermer que ces fonctions et leurs dérivées ».

Toutefois on peut rattacher ces fonctions à des expressions qui, elles, ont un sens physique. Et ce sens physique est bien remarquable. En l'analysant on retrouve toujours, de plus ou moins loin, quelque chose de subjectif dans cette signification. Ce retour offensif du subjectif dans l'effort scientifique qui, depuis le XVIIe siècle, avait eu pour fin l'objectif et la déshumanisation de la physique, s'accorde bien logiquement avec toute l'orientation pragmatiste que

(1) Cf. Becquerel, *Thermodynamique*, p. 208 sq.
(2) *Id.*, p. 210.

nous croyons entrevoir dans la philosophie de l'énergétisme. C'est ce que nous allons examiner.

III

Energie libre et énergie liée.

En partant des fonctions de Massieu ou avec les grandeurs qu'elles mettent en rapport, on a pu former de nouvelles fonctions dont la considération est ou plus commode ou plus synthétique.

C'est ainsi que Duhem a établi ce qu'il a nommé — par analogie avec le rôle que jouent en mécanique les fonctions de forces qui, comme la gravitation, admettent un potentiel — les potentiels thermodynamiques internes ou à volume constant, ou total, sous pression constante. Ce ne sont autre chose que les fonctions de Massieu changées de signe. La première de ces deux nouvelles fonctions avait été déjà atteinte par Gibbs, qui l'avait appelée l'*énergie utile*, et par Helmholtz, sous la dénomination d'*énergie libre* d'un système. Ces deux désignations révèlent immédiatement la signification physique de ces fonctions.

L'énergie libre de Helmholtz est cette partie de l'énergie totale d'un système qui peut se transformer en travail. Comme on voit, on donne au travail mécanique une importance privilégiée. Quelle en est la raison ? Il n'y a qu'une réponse possible. L'utilité manifeste qu'a pour nous ce travail. Il est la mesure de l'utilisation de l'énergie. Nous voyons bien là l'étroit rapport que nos sciences continuent à entretenir avec les techniques dont elles sont, à peu près, sorties, si nous élargissons le sens du mot technique jusqu'au sens d'une « opération » en général, d'une action — quelle qu'elle soit — sur des forces quelles qu'elles soient — sur des « pouvoirs ».

Or le travail mécanique est le signe du « pouvoir » dont l'énergie est susceptible. Il en est la mesure *humaine*.

On pourra bien faire remarquer, on doit faire remarquer, que, dans l'expression de Helmholtz aussi bien que dans les expressions de Duhem (*potentiel* thermodynamique), la signification *humaine* de la mesure a disparu. L'énergie libre, nous ne pouvons jamais l'utiliser humainement tout entière. Et la plupart du temps nous sommes très loin de l'utiliser à peu près tout entière. Le rendement utile de la machine à vapeur la plus perfectionnée n'est qu'une petite partie, moins d'un tiers du rendement de la machine thermodynamique idéale, qui fonctionne selon le cycle de Carnot et moins de la moitié pour les moteurs à gaz et à pétrole (cycles Joule, Lenoir ou de Rochas). Par conséquent le potentiel thermodynamique de Duhem, l'énergie libre de Helmholtz se rapportent à des capacités *objectives*, et non plus humaines, de transformation de l'énergie en travail.

C'est exact. Mais qui ne voit que l'idée même d'évaluer une transformation d'énergie en travail et d'avoir donné ce nom de travail au résultat de cette évaluation est au fond une idée anthropomorphique. Ce qui nous a amené à distinguer l'énergie libre de l'énergie liée, à former le potentiel thermodynamique interne d'un système (sa capacité de travail au fond), c'est psychologiquement l'idée de ce que nous pouvons tirer d'un système. Nous ne pouvons même pas en tirer tout ce que les déductions mathématiques nous permettent de calculer. Il y a eu là aussi mathématisation, idéalisation ou plutôt idéation du système, rectification des contingences et des différences empiriques vers une nécessité universelle théorique, une uniformité théorique. C'est entendu. Mais le fond psychologique,la tendance de la pensée reste la même. Ils sont tournés tous deux vers l'utilisation humaine de l'énergie.

Dans la nature, le travail mécanique n'est qu'une forme de l'énergie comme toutes les autres. Il n'a de

privilège que celui qu'il prend à nos yeux d'hommes, parce que c'est lui que nous utilisons, et que c'est par rapport à lui que nous estimons la valeur des énergies naturelles. En réalité la diminution du pouvoir de transformation d'un système, — l'augmentation de l'entropie — peut tout aussi bien être dans l'absolu, dans l'objectif pur, un progrès qu'un déclin. Ce que nous appelons par rapport à nos opinions subjectives d'homme, et d'homme né à l'Occident de l'ancien monde, la mort de l'univers, le repos éternel, etc., peut bien être, absolument parlant, la vie la plus haute dans l'unité totale et parfaite. Mieux que l'activité incessante, elle exprime l'éternel, l'immuable en lesquels tant de métaphysiques — et de religions — ont mis la perfection.

La marche de l'Univers, nous l'estimons une tendance vers un but et ce but nous l'estimons par rapport à notre pauvre idéal d'inquiétude et d'agitation perpétuelles, qui met le mouvement au-dessus du repos et la durée au-dessus de l'éternité.

Mais, absolument parlant, la marche de l'Univers est simplement un changement. Les états ultérieurs de ce changement, en eux-mêmes, et par rapport aux états antérieurs, sont *autres* et voilà tout. Cette partie croissante de l'énergie, qui ne peut plus se transformer spontanément en travail mécanique, reste de l'énergie qui, en elle-même en toute objectivité, vaut l'autre. C'est de l'énergie calorifique et c'est surtout de l'énergie. Elle ne peut plus se transformer spontanément en une autre forme. Et après ? quelle nécessité objective y aurait-il à ce que s'opérassent de telles transformations ?

L'épithète « dégradée » qu'on lui applique est encore une expression toute anthropomorphique. Elle n'a qu'une valeur humaine, subjective.

Nous verrons d'ailleurs que si nous pouvions avoir prise sur les molécules, sur les atomes, directement et isolément, les choses n'auraient peut-être plus pour

nous cette apparence inéluctable. Elles seraient en tout cas susceptibles d'en prendre exceptionnellement une autre. Et la rareté de l'exception ne fait rien à l'affaire. Si rare qu'elle soit, elle se réalisera forcément une fois ou l'autre, à moins qu'une volonté arbitraire et extérieure au monde de la physique et de la science n'y vienne mettre obstacle. Mais nous reviendrons sur ce point un peu plus tard.

Ce qui nous semble devoir être retenu, pour le moment en tout cas, est bien net. Nous classons dans tout système l'énergie dont la quantité est constante, en deux parties : celle qui peut se transformer en travail mécanique, celle qui ne le peut plus. La première constitue le potentiel thermodynamique interne, c'est l'énergie libre d'Helmholtz. L'autre c'est l'énergie liée. Mettons-nous dans un cas simple : le cas où un système se transforme à température constante, le cas d'une transformation isothermique. Alors tout travail tiré de l'énergie libre la diminue, et le travail produit est toujours au plus égal — c'est le cas idéal de la transformation réversible — à la diminution de l'énergie libre. Dans une transformation isothermique réelle il lui est toujours inférieur. D'autre part toute chaleur absorbée par le système ne fait qu'accroître dans les deux cas l'énergie liée.

Ainsi, énergie libre revient à dire énergie utile pour produire une transformation. Potentiel thermodynamique interne est synonyme de capacité utile de transformation. Nous pouvons bien dire, et certes, nous en avons le droit, que, dans son effort vers l'objectif, le savant, ici comme ailleurs, a élargi le sens du mot utile pour lui retirer tout ce qu'il a pu de son caractère humain. Mais il ne l'a pas éliminé complètement. On retrouve l'emprise psychologique qui lui fait considérer que cette partie de l'énergie, qui reste capable de se transformer spontanément en travail

mécanique, doit être mise à part, dans l'évolution de l'énergie totale (1).

Au fond c'est la partie d'énergie qui peut faire quelque chose, à notre échelle, dans le monde de notre perception, de nos sensations : le seul monde d'ailleurs que la philosophie de l'énergétique ait, de propos délibéré, voulu connaître. Et ceci se relie encore à cette idée qui naît avec Comte, mais avec une signification plus objective, et plus intellectualiste, qui grandit, s'épanouit avec le pragmatisme : La loi scientifique est avant tout une formule technique au sens étroit du mot : technique, c'est-à-dire d'utilisation, une formule utilisable par rapport à notre action sur la nature. L'application de la formule à la nature évoque toujours psychologiquement l'utilisation de la nature, son asservissement à nos besoins. L'énergie libre et l'énergie liée, ce sont donc, si l'on remonte psychologiquement aux origines, l'énergie qui peut, en dernière analyse, nous servir, et celle dont nous ne pouvons plus rien faire : morte, oui, mais en elle-même et sous une autre forme toujours aussi vivante. Car la quantité de mouvement reste, somme toute, — si on l'entend bien, — constante, comme celle de l'énergie ; et la physique contemporaine, dans un renouveau d'objectivité, ne voudra, ni ne pourra se passer de ce second principe de conservation plus que de l'autre.

Quel que soit l'effort d'abstraction auquel on s'élève avec Duhem et Helmholtz dans la définition de la fonction, on y a été conduit, psychologiquement, par l'idée latente de l'utilisabilité de l'énergie, par un pragmatisme de derrière la tête.

(1) Nous aurons à revenir ultérieurement du reste sur cet effort d'objectivité qui, au moment où l'on réintègre dans la science des éléments restés jusque-là subjectifs et où l'on réhabilite certaines formes de subjectivité, perce quand même et vient réclamer sa part. Il y a là une donnée psychologique qui nous semble précieuse pour caractériser l'esprit scientifique.

IV

Transformation compensée et non compensée.

On pourrait dire la même chose d'une expression antérieure et plus générale que Clausius a tirée de la considération directe de l'entropie : la transformation compensée et non compensée. Si j'imagine un cycle *réversible* qui permet de faire passer un système d'un état initial donné à un autre, et de le ramener ensuite à cet état initial, je sais que toute différence d'entropie dans le premier passage est rigoureusement *compensée* par des différences d'entropie égale et de signe contraire dans le second : La variation d'entropie est nulle. Considérons maintenant une transformation *réelle* quelconque, donc *irréversible*, qui amène le même système du même état initial au même état final. Alors le retour par voie réversible ne *compensera* plus la différence d'entropie de l'aller par voie irréversible. Il s'introduira toujours un terme négatif dépendant de toutes les transformations intermédiaires dans la transformation irréversible, terme qui n'existe pas dans la transformation réversible correspondante. Ce terme exprimera une valeur *non compensée* par la valeur de la transformation réversible inverse.

Si nous considérons alors non plus l'entropie, mais l'énergie calorifique elle-même absorbée dans une transformation isothermique, nous voyons de même qu'entre une transformation irréversible et une transformation réversible exécutées entre le même état initial et le même état final, il y a toujours un écart, représenté par un terme, lui aussi toujours négatif, qui s'introduit nécessairement dans l'expression de la transformation irréversible, et qui ne peut exister dans celle de la transformation réversible. Clausius l'a appelé l'*énergie non compensée*, tandis que la seule énergie calorifique absorbée dans la transformation réversible correspondante est l'*énergie compensée*.

On les nomme encore chaleur compensée et chaleur non compensée, si on les évalue en calories. L'énergie non compensée représente le travail de la résistance passive, c'est-à-dire l'énergie absorbée en d'autres transformations que la transformation visée et telle qu'on pourrait l'obtenir par la voie la plus économique : l'énergie usée en d'autres travaux que le travail minimum qui nous permettrait d'atteindre l'état final, le but, que nous envisageons.

Ici encore se retrouve latente l'idée psychologique du résultat *utile* pour nous, du résultat qui mérite d'être pris en *humaine* considération, qui a une valeur humaine. Car dans la nature, objectivement, le travail des résistances passives doit être mis sur le même rang que l'autre. Le privilège de ce dernier vient de notre estimation qu'une partie des effets de l'énergie vaut plus que l'autre. Mais elle ne vaut plus que parce que nous déterminons et isolons psychologiquement un but particulier à atteindre, au milieu des buts dispersés de la nature, un état dit final dans la chaîne indéfinie des états qui, dans la nature, sont tous des fins naturelles.

L'énergie non compensée correspond à la quantité d'énergie libre non utilisée, dite dégradée ou dissipée, pour employer d'autres expressions qui appellent invinciblement la même idée psychologique. Car cette dégradation et cette dissipation n'ont de valeur péjorative que pour des considérations qui dépendent de nous. Sinon elles expriment simplement des modalités naturelles des transformations de l'énergie étrangères à la notion de valeur.

Dans l'utilisation de l'énergie en général, il y a un premier départ entre l'énergie libre et l'énergie liée. Et ce départ, nous avons été conduit à le faire par cette tendance psychologique qui nous amène à considérer, à part et d'une façon privilégiée, le travail mécanique, la transformation en travail mécanique, parce que c'est celle-là qui nous intéresse, humaine-

ment parlant. Mais absolument parlant, elle est de l'énergie comme toutes les autres et doit être comptée sur le même rang : ce qu'affirme le principe de conservation de l'énergie.

V

Energie utile.

Dans l'utilisation de cette énergie libre, il y a lieu de faire un nouveau départ. Certains travaux ne nous servent à rien. Ils consomment de l'énergie, sans profit pour le but que nous visons. C'est l'énergie non compensée.

Le souci subjectif d'utilité est encore plus marqué ici que dans la première étape. La première étape se place à un point de vue cosmique. La nature tend vers une impossibilité croissante de transformation en travail mécanique. L'énergie libre c'est la fraction d'énergie transformable en travail. Mais cette considération particulière de la possibilité d'une transformation en travail mécanique, pour cosmique qu'elle soit, laisse deviner une idée psychologique et subjective d'une *valeur* de ce travail. Nous ajoutons au jugement d'existence, si déguisé qu'il soit, un jugement de valeur.

Dans la seconde étape, la subjectivité est plus manifeste. Le jugement de valeur devient patent. Gibbs, qui appelle les choses par leur nom, et qui est surtout intéressé par le côté pratique de la science, a étalé le jugement de valeur, et les dessous psychologiques qui ont orienté toutes ces recherches. L'énergie libre, le potentiel thermodynamique interne, fonction à laquelle il est arrivé indépendamment d'Helmholtz, et bien avant Duhem, il l'appelle, sans ambages, énergie *utile*. Et nous avons ici la mise en évidence nette de tout le processus psychologique que nous avons soupçonné jusqu'ici, sous des dénominations qui s'efforçaient d'être plus objectives.

Il est certain que l'énergétisme, chez nombre de ses représentants, qui ont réfléchi sur leur doctrine, a donné la main au pragmatisme, à la philosophie de l'action. Ce n'est pas un hasard, ni une contingence. Il y a certainement ici rapports de tendances, rapports instinctifs et étroits. En outre la plupart des savants énergétistes ont été de ceux qui se soucient plus des applications pratiques que des idées pures, et qui envisagent une science de métier plus qu'une science philosophique, l'action, plus que la satisfaction rationnelle. Le côté empirique, le côté technique de l'énergétisme se révèlent ici sans équivoque. Et ils se relient à tout un ensemble de tendances qui constituent une philosophie de l'énergétisme. Ces tendances d'ailleurs constituent aussi une philosophie de la science qu'on suit à travers toute l'histoire des sciences, ici dominante et étalée, là plus dissimulée et étouffée par l'épanouissement des tendances inverses et d'autres philosophies.

L'énergie utile sera donc cette partie de l'énergie qui peut dans un système clos et isolé, c'est-à-dire spontanément, naturellement, ou comme on dit encore depuis la théorie de la relativité, avec les seuls moyens du bord, se transformer en travail mécanique. Le travail mécanique est donc une notion privilégiée, mais vraiment privilégiée cette fois dans l'énergétique. Elle oppose son privilège à la disgrâce de l'énergie calorifique. Et cette antithèse qualitative est au fond de toute la théorie, comme dans la société féodale, toute la vie sociale est dominée par l'antithèse qualitative de la noblesse et de la roture.

Il faut se garder d'ailleurs de confondre l'énergie utilisable avec l'énergie utile, car la première n'est encore en général qu'une partie de la seconde. Elle est cette partie de l'énergie utile dont le travail n'est pas employé à vaincre les résistances passives, dont le travail est utilisé, ou utilisable à la fin que *nous*

assignons au système. Le caractère de subjectivité devient encore ici plus manifeste.

VI

Le principe de Le Châtelier.

Ce n'est pas par un hasard historique que tous les efforts pour déterminer les lois de l'utilisation des transformations énergétiques apparaissent à ce moment-là dans l'histoire et relient cette utilisation à l'énergétique elle-même. Celle-ci fournit à la fois le moyen et l'occasion de formuler ces lois. Mais bien plus encore elle attire, elle concentre l'attention des savants sur la recherche de ces formules. Toute la période que nous examinons en est pleine. Elles ont apporté d'ailleurs à la science, en général, les plus précieuses contributions.

Il en est ainsi du principe si fécond qu'on doit à M. Le Châtelier. Ce principe résume, en les généralisant et en les synthétisant, des lois découvertes par Moutier, Robin et Van l'Hoff. MM. Gouy et Raveau lui ont donné sa forme peut-être à la fois la plus précise et la plus large ; leur travail intéressera surtout parce qu'il aura pour but d'éliminer, autant que faire se peut, l'aspect subjectif des premières expressions du principe.

Toutes les lois qui servent à prévoir comment va se comporter un système une fois que son équilibre est rompu, apparaissent comme des conséquences du principe de Carnot. « Tout déplacement de l'équilibre chimique est en effet régi par ce grand principe général d'évolution... Il est évident qu'il y aurait avantage à englober tous les cas de déplacement d'équilibre chimique dans un énoncé unique moins général, mais d'une application plus immédiate que le principe de Carnot lui-même (1) ».

(1) Urbain, *L'énergétique des réactions chimiques*, p. 121.

Un tel énoncé a été donné en 1884 par M. Le Châtelier qui lui a attribué plus récemment la forme suivante : « Toute variation de l'un des facteurs de l'équilibre tend à produire une variation de l'état d'équilibre dans un sens tel qu'il en résulte une variation de sens contraire du facteur considéré ». L'exemple le plus typique et le plus généralement énoncé est la loi de Lenz.

Lorsqu'on tend à augmenter la force d'un courant électrique dans un conducteur, il se produit un contre-courant qui tend à diminuer d'abord cette force, avant que s'instaure le régime d'équilibre. Inversement dans le sens contraire. Cette expression du principe s'efforce, déjà sous la forme que nous venons d'emprunter à M. Le Châtelier, d'être objective. Et les corrections que son auteur et M. Mouret lui ont apportées par la suite ont renforcé encore cette objectivité. Tout de même il n'est pas difficile d'apercevoir dans la formulation de la loi, si l'on songe que le principe est presque toujours employé pour déterminer le sens d'une opération tentée sur les phénomènes naturels, la possibilité d'une antithèse psychologique entre la volonté, le but d'un opérateur et le cours naturel des choses, entre ce qui serait utile du point de vue de l'opérateur et ce qui se produit dans la nature. Il semble que la nature résiste à cette volonté et s'y oppose. Il y a là, semble-t-il, une considération d'origine utilitaire et anthropomorphique. Evidemment le phénomène se produira de même façon si, en dehors de toute volonté opératrice, le développement naturel des phénomènes au sein d'un système amène des modifications dans l'état d'équilibre où il se trouvait d'abord. La nature semblera résister au changement d'équilibre dans le sens où ce changement va se produire. Mais on voit que l'interprétation de certains effets par le principe suppose dans la nature une qualité assez subjective : la résistance, l'opposition au sens de la transformation qui va s'ef-

fectuer, comme si la nature elle-même était contraire au changement, et amie de la stabilité.

Les premières formes du principe, les commentaires auxquels elles ont donné lieu, sont d'ailleurs à l'époque allés beaucoup plus loin que les expressions de son auteur ne le permettaient : « Toute action extérieure produit dans un corps ou dans un système un changement dont le sens est tel que la résistance opposée par le corps ou le système à l'action extérieure augmente (1) ». « D'après le principe de Le Châtelier, la modification [provoquée par une action extérieure en un système] sera telle qu'elle s'opposera à l'action extérieure... Au point de vue philosophique il présente une grande importance ; il montre en effet que, lorsque l'on cherche à *violenter* un système en état d'équilibre stable, les réactions sont telles que l'énergie que doit dépenser l'agent extérieur est *plus grande* que si ces réactions n'existaient pas (2) ».

Au point de vue philosophique, pour reprendre l'expression de A. Pérot, cette forme donnée au principe de Le Châtelier est en effet très importante. Elle montre bien les tendances pragmatistes incluses dans le mouvement énergétiste, latentes chez certains de ses promoteurs, avouées chez les autres, chez la plupart.

VII

Caractère pragmatiste de toutes ces notions.

A coup sûr cette interprétation de la science est parfaitement possible, puisqu'elle est. Et la tendance de certains savants à considérer essentiellement la science du point de vue de ses applications techniques, comme le fondement de notre industrie, doublée par la tendance à voir la convention et l'arbi-

(1) Chwolson, *Traité de Physique*, t. III, p. 477.
(2) A. Pérot, *Cours de l'Ecole Polytechnique*, extrait d'une citation de J. Becquerel, *Thermodynamique*, p. 257.

traire dans les principes et dans les théories, — dans tout ce qui vise à donner une signification à la loi scientifique, une explication et une compréhension de cette loi, bref un savoir philosophique, — tout cela a ses fondements dans le développement historique de la science. C'est, pensons-nous, un point de vue partiel, insuffisant, mais c'est un point de vue qui a des raisons plausibles. Il y a évidemment dans la science une direction pratique que doit relever toute épistémologie positive, soucieuse de ne pas altérer les faits, de ne pas les plier à une interprétation personnelle, soucieuse de rester objective et de présenter fidèlement le tableau de la science telle qu'elle se fait et telle qu'elle est.

Le mouvement énergétiste est assurément le mouvement d'idées et de pensée qui, à la fin du XIXe siècle, par réaction contre une science volontiers trop hypothétique (que nous avons appelée jadis l'ontologisme du mécanisme traditionnel), a exprimé avec force et avec des arguments de poids cette tendance psychologique. Il s'est efforcé de la réaliser, de la traduire d'une façon technique.

Nous avons insisté sur le caractère d'empirisme qui masque sa physionomie générale. N'être que le discours de l'expérience, voilà le caractère de la théorie énergétiste.

Nous venons de constater maintenant comment le développement même des fonctions qui caractérisent les systèmes naturels ont amené à poser des notions qualitatives autant que quantitatives. Leur caractère pragmatiste d'une part, anthropomorphique ou anthropocentrique, « humaniste », de l'autre, est patent.

A cette interprétation, nous le répétons, il y a des motifs sérieux. Seulement si l'on ne reconnaît pas que ces motifs, pour sérieux et légitimes qu'ils soient, ne sont tirés que d'un aspect partiel de la science, il faut bien alors avouer — et l'on ne s'est pas laissé

prier pour le faire — qu'on tourne le dos à la pensée philosophique qui avait suscité depuis la Renaissance une tout autre direction de la pensée scientifique — le mécanisme traditionnel entre autres. Celle-ci s'efforce, dans toute la mesure possible, vers une science objective indépendante de l'homme. On y eût voulu faire disparaître soit l'arbitraire, soit les fins humaines du pur savoir. L'application technique est une conséquence du savoir. Elle n'en est ni la fin unique ni la fin suprême. Surtout, conditionnée par lui, elle ne le conditionne pas.

CHAPITRE II

LES EFFORTS POUR SORTIR DU SUBJECTIVISME SUR LE TERRAIN DE L'ÉNERGÉTISME

I

La nouvelle forme du principe de Le Châtelier.

Qu'il y ait une direction psychologique qui s'achève en une direction épistémologique, ou une théorie de la science et de la connaissance, c'est ce que révèle, croyons-nous, un essai d'interprétation de l'énergétique sur un autre clivage.

Ce qui donne à l'énergétisme sa couleur pragmatiste et humaniste, c'est d'abord la canalisation du développement de la science vers les applications pra-

tiques, telle qu'elle s'aperçoit dans nombre de travaux de l'école. C'est d'autre part et surtout, le point de vue qualitatif et partant subjectif — au sens cartésien du mot — qui entraîne avec des différenciations qualitatives entre ce qu'on a appelé les forces naturelles, la reprise des notions de tendance et de direction privilégiée dans les phénomènes naturels. Le principe de Le Châtelier, le principe de Carnot, plus fondamentalement le rôle spécifique que joue la chaleur vis-à-vis du travail mécanique, voilà les grandes manifestations de cet esprit. Cet esprit va changer complètement, comme nous le verrons, dès les dernières années du XXe siècle. Le retour à l'esprit du mécanisme (nous ne disons plus au mécanisme, au sens étroit du mot [1]) se poursuit depuis lors. Mais antérieurement à l'acceptation à peu près unanime de ce retour, on voit un effort très net au sein même de l'énergétisme pour donner à la théorie plus d'objectivité, et la déshumaniser dans toute la mesure possible.

L'analyse qui fut poursuivie du principe de Le Châtelier par son auteur lui-même a permis de lui enlever progressivement ce que sa première forme avait de trop manifestement anthropomorphique. Voici le second énoncé qu'il en a donné avec M. Mouret en 1891 : « Quand un système chimique est en équilibre, si l'on augmente l'une des tensions, l'autre restant constante, la réaction chimique qui s'accomplit est celle qui se fait avec une absorption d'énergie latente de même espèce que celle de la tension qui a varié. Si cette énergie latente est nulle, la variation de tension est sans influence sur l'état chimique du système (2) ».

Cette tendance universelle qu'aurait la Nature à résister contre la violence que lui fait la volonté hu-

(1) Qu'on pourrait définir la réduction des phénomènes physiques aux seuls systèmes de la mécanique rationnelle classique.

(2) *Revue générale des Sciences*, 28 février 1891.

maine, pour l'utiliser, a disparu. La Nature ne résiste plus. Elle n'a plus non plus cette tendance à la stabilité, cette sorte de persévérance finaliste dans l'être de son équilibre qui sourdissait sous le principe, et qu'on retrouve au bout de tant d'interprétations du principe de Carnot lui-même.

Le premier énoncé présentait « le grave inconvénient de faire croire à une tendance générale et systématique à l'opposition et à la contrariété. On ne saurait donc s'étonner qu'il ait été presque toujours ainsi interprété. S'il n'est pas à proprement parler inexact, il est tout au moins incorrect en ce sens qu'il évoque une idée fausse. La Nature n'a pas si mauvais caractère ! et il ne faut pas ériger en principe l'esprit de contradiction, puisqu'il existe certains effets, les effets stables qui, *diminuant le travail à fournir*, *viennent en aide à l'opérateur*. Suivant l'expression de M. Raveau : « il est temps de réhabiliter la Nature. Si elle contrarie certaines tendances, elle favorise les tendances opposées (1) ».

II

Les idées de Gouy.

Mais déjà le travail de M. Gouy avait rectifié ce qu'avait de téméraire l'interpolation universelle du premier énoncé de M. Le Châtelier. Le mémoire de 1889 a définitivement remis les choses au point ; et d'autant mieux qu'il part de la même position anthropomorphique, pour aboutir à une solution rigoureusement objective de la question.

M. Gouy considère d'abord des systèmes monothermiques, c'est-à-dire qui ne travaillent qu'avec une seule source de chaleur, celle-ci restant pratiquement à température toujours constante. Il n'y a pas là de contradiction avec le principe de Carnot. Ce der-

(1) Cf. J. Becquerel, *Thermodynamique*, p. 257.

nier indique bien qu'une machine thermique ne peut fonctionner qu'avec deux sources de chaleur. Mais ces sources peuvent être considérées comme des sources auxiliaires, secondaires, englobées dans une source à température pratiquement constante, l'atmosphère. Le charbon et l'oxygène qui détermineront par leur combinaison l'élévation de la température de la source chaude sont pris à la température et à la pression atmosphériques ambiantes. Et ils sont ramenés finalement à cette même température et à cette même pression sous forme de gaz carbonique. Et ce sont vraiment là les seuls agents réels de la transformation, l'eau et sa vaporisation n'étant elles-mêmes que des intermédiaires, tout comme les pièces métalliques de la machine proprement dite.

Dans ces systèmes monothermiques, qui constituent ainsi une forme très générale des systèmes naturels, M. Gouy détermine une fonction qui nous donne la valeur de l'énergie *utilisable*, c'est-à-dire le travail, le nombre de kilogrammètres que ce système peut effectivement, au maximum, fournir d'une manière quelconque en passant d'un état à un autre, tous deux bien déterminés. Cette fonction de l'énergie utilisable, rappelons-le, ne doit pas être confondue avec celle de l'énergie utile. Elle n'en est, en général, qu'une partie : c'est le maximum théorique d'énergie que peut recueillir l'opérateur qui provoque la transformation, par son action propre. En réalité, ce qui caractérise l'énergie utilisable c'est la considération de l'action de l'opérateur, et du travail, plus précisément du maximum théorique de travail, qui lui est fourni, à lui, opérateur, du chef de son action.

Nous voyons que nous partons bien du point de vue pragmatique et utilitaire de l'énergétisme, comme en sont partis Moutier, Robin et Le Châtelier. Mais nous allons chercher une expression universelle qui indique objectivement la façon dont toutes les transformations naturelles se comportent vis-à-vis de

l'action de l'opérateur : un critère objectif. Et c'est cet effort caractéristique qui nous intéresse au point de vue philosophique, car il montre là soit une tendance de l'esprit humain, soit une manière d'être du réel, soit, plus vraisemblablement, les deux en même temps, l'une impliquant l'autre et ne se concevant pas sans l'autre.

La fonction de M. Gouy : l'énergie utilisable, implique et exprime à la fois l'application du principe de l'équivalence et du principe de Carnot. Le travail maximum que peut recueillir l'opérateur est fourni par une transformation telle que s'il a dépensé un certain travail pour faire passer le système de l'état initial à l'état final, il puisse, par un travail identique et de signe contraire (de sens contraire), ramener le système de l'état final à l'état initial. C'est une transformation réversible à l'égard du travail de l'opérateur, plus large, en principe, que la transformation réversible classique, puisqu'elle peut admettre, au sein du système, des modifications irréversibles, indépendantes du travail de l'opérateur.

La variation de la fonction exprime dans tous les cas, si on la change de signe, la plus grande valeur du travail que le système est susceptible de fournir à l'opérateur : d'où son nom d'énergie utilisable.

Dans toute transformation monothermique accomplie avec retour à l'état initial — ce qui est le cas de toutes les machines, lesquelles travaillent suivant un cycle périodique — le travail fourni est nécessairement négatif, puisqu'il faut dépenser pour ramener le système de l'état final à l'état initial le même travail qui avait été fourni en passant de l'état initial à l'état final. Et il faut en outre que l'opérateur dépense du travail pour entretenir le mouvement périodique : le travail destiné à vaincre les résistances passives, d'une part, et à assurer, d'autre part, le rétablissement des différences de température nécessaires au cours des transformations internes du sys-

tème. Nous retrouvons ici le principe de Carnot et nous pouvons écrire, en conséquence, que le système est en équilibre stable lorsque l'énergie utilisable est minima.

En somme, on voit que tout l'effort de M. Gouy, jusqu'ici, revient à chercher un moyen de décrire un système et ses possibilités de transformations conformément aux principes de la thermodynamique, mais en séparant des forces qui agissent sur le système la part de l'opérateur, en visant d'une façon précise l'action humaine sur la Nature, l'utilisation *anthropomorphique* de celle-ci, tout comme le principe de M. Le Châtelier.

Toute action de l'opérateur a pour but de produire une transformation spontanée d'un système, laquelle lui donne certains effets cherchés.

Observons maintenant la nature de ces effets au point de vue de la stabilité de l'état auquel l'amène la transformation spontanée que nous envisageons.

Certains effets produits par l'action de l'opérateur peuvent disparaître ensuite au cours de l'évolution spontanée que cette action a provoquée dans ce système. Ce sont des effets *instables*. D'autres au contraire, suspendus jusque-là, se produisent et subsistent : ce sont les effets *stables*. Ces états peuvent être, au moins théoriquement, conservés aussi *longtemps qu'on veut*, si la transformation s'arrête et se maintient à l'un d'entre eux : c'est ce qui distingue les états ou effets instables des transitions d'un état à un autre.

En parlant de la considération de l'énergie utilisable, M. Gouy déduit, par le raisonnement mathématique, que l'*effet s'oppose à l'action de l'opérateur s'il est instable, mais au contraire le favorise s'il est stable*. Voilà le principe absolument général destiné à remplacer les lois de Moutier et Robin, et le principe de M. Le Châtelier. Le critérium est transporté de l'intention de l'opérateur à la nature objective des modifications naturelles. On voit que l'énoncé est

beaucoup plus objectif, et que tout le travail de M. Gouy a été dirigé par un effort opiniâtre d'objectivité, en partant de considérations subjectives et anthropomorphiques : l'utilisation par l'homme des transformations naturelles et, par conséquent, la prévision de leur sens, de leur direction, par l'opérateur et par rapport à lui. Utiliser la Nature, utiliser les transformations d'un système, n'est-ce pas avant tout prévoir le sens dans lequel le système se transforme : le cours de la Nature ?

III

Objectivité de la théorie.

L'effort scientifique a visiblement cherché à faire évanouir ce qu'il restait de subjectif dans le principe de Le Châtelier : à savoir la notion de tendance, encore qu'elle fût aussi objective que possible, et la notion de contrariété par rapport à l'action de l'opérateur, partant de résistance constante de la Nature en réponse à l'action humaine, ou à l'action qui vient déplacer son équilibre actuel. Les deux notions jointes ensemble prenaient alors un aspect anthropomorphique et finaliste où l'empreinte de la subjectivité est manifeste. C'est une Nature conçue à notre image : une Nature qui aurait comme on l'a dit tout à l'heure « mauvais caractère ».

Au fond, la Nature telle que la définit et la voit maintenant le physicien est indifférente. Elle est *objective*. Entre toutes les actions qui peuvent s'exercer sur elle, il se trouve que certaines se heurtent à une contre-résistance, d'autres non. Et il n'est pas impossible de comprendre objectivement pourquoi : objectivement, c'est-à-dire par des raisons tirées des phénomènes naturels eux-mêmes de leur structure et non de tendances par rapport à l'action que nous tentons d'exercer sur elle.

Les effets, les fins que nous poursuivons pour notre

utilité, sont de nouveaux états d'équilibre que nous substituons à ceux qui nous servent de point de départ à ceux sur lesquels nous agissons.Ces états d'équilibre, de par leur constitution objective, sont instables, ou stables. Et c'est cela qui décide du sens de la réaction que nous rencontrons dans la Nature.

L'opérateur, lui, cherche un effet stable. Aussi les effets instables rencontrés dans l'opération se trouvent-ils contrarier, par la force des choses, son action. Au contraire, l'effet stable la favorise. D'une façon plus précise, supposons que nous ayons deux moyens d'aller de l'état initial à l'état final, bref, deux chemins possibles. Sur un des chemins les effets instables qui sont produits par l'action de l'opérateur se dissipent d'eux-mêmes, spontanément, à mesure que se produisent les effets stables. Dans l'autre au contraire, ils ne diminuent pas d'eux-mêmes. Nous devons dépenser du travail pour les détruire, et la transformation spontanée restitue alors sous forme *inutilisable* cet excès de travail que doit fournir l'opérateur. De là la résistance, la contrariété que son action paraît susciter dans l'évolution naturelle du système. La nature s'oppose à l'action tentée sur elle. Mais cela tient comme on voit à la constitution même du système considéré. Le système autrement constitué, l'effet stable cherché est au contraire favorisé par l'évolution spontanée du système, au lieu d'être contrarié par elle. La Nature nous aide.

Le succès, ici, a donc couronné complètement l'effort du physicien pour désubjectiver et désanthropomorphiser l'étude du sens des transformations naturelles, et particulièrement l'étude du sens des transformations provoquées directement par l'homme lui-même, dans un but utilitaire. C'était le point le plus sensible. L'énergétisme sorti des spéculations sur la machine à feu, sur le rendement des machines, sur les transformations à cycles périodiques provoquées par l'homme pour utiliser au mieux possible

les énergies naturelles, avait tout naturellement porté d'abord l'empreinte de ces recherches. L'idée de direction, de sens de l'évolution des phénomènes, d'adaptation des phénomènes à un nouvel état d'équilibre et par suite d'opposition préalable à tout ce qui trouble l'état d'équilibre initial, — toutes notions qui voisinent de près avec des notions de tendance et de finalité, et avec ces notions considérées en prenant les buts humains pour centres et repères, — ont été de plus en plus écartées par les physiciens contemporains.

On ne peut voir dans tout ce travail que la continuation du travail d'objectivité entrepris depuis les origines historiques de la physique, sur les notions qui lui servent de fondement, et sur la conception qu'elle se fait de la Nature.

IV

Les éléments subjectifs fonciers de l'énergétisme.

Mais il reste, à notre sens dans l'énergétisme, quelque chose de foncièrement subjectif. Et c'est ce quelque chose qui est le plus important au point de vue philosophique. Le caractère pragmatique et utilitaire des applications peut bien être effacé de toutes ces théories qui les fondent. Il n'en subsiste pas moins que l'énergétisme a rétabli le point de vue de la qualité et du spécifique. Il a rétabli également un sens dans l'Univers et une tendance. Et ce faisant, bien que nombre de physiciens n'en aient point été conscients, ou s'en soient défendus, mais comme Duhem l'a admirablement analysé et vu, il est revenu, par de là le mécanisme cartésien, à un esprit, qui, malgré toute la différence des notions employées (les qualités, le sens et la tendance sont d'ordre tout à fait différent), peut s'apparenter malgré tout à une tradition physique antérieure au mécanisme galiléo-cartésien.

L'esprit de la science moderne, dans son effort d'objectivité, qui la définit presque comme un pléonasme, se montre encore ici gêné par ce résidu subjectif. La protestation constante de ceux qui veulent rester dans la tradition est au fond motivée par ce retour à des notions plus ou moins imprégnées de subjectivité. Tout comme, dans le cours du XIXe siècle, les efforts de la même lignée de savants pour se passer de la notion de force, ou ne l'utiliser qu'à titre de symbole d'attente.

Mais au sein même de l'énergétisme aussi bien que dans le dynamisme issu de Newton, on essaie de considérer la notion d'énergie, la notion des énergies et le principe de Carnot, sous un angle plus objectif. On essaie d'en fournir une image d'où le qualitatif d'une part, la tendance naturelle, d'autre part, soient, dans toute la mesure possible, harmonisés avec l'instinct objectiviste. Tant il fait corps avec l'instinct scientifique.

Ostwald et M. Selme ont été, entre tous, inspirés par ce désir — plus ou moins heureusement. Si ces tentatives n'ont pas eu une très grande portée scientifique — la dernière surtout, qui se heurte à des difficultés techniques réelles — elles n'en sont pas moins très précieuses à notre point de vue psycho-philosophique. Elles montrent, par le fait même, le tourment de l'objectif dans la construction scientifique, et au moment même où celle-ci reprend des éléments jusque-là négligés parce qu'au fond ils étaient restés apparentés au monde subjectif.

Comment le mécanisme — et en particulier — le plus conscient, et le plus grand de ses fondateurs avaient-ils réussi à éliminer le subjectivisme qui leur paraissait inhérent à la physique antérieure ? Tout d'abord en séparant nettement la réalité physique de ce qu'ils considéraient comme l'apparence sensible. Ils substituent à des événements caractérisés par les diverses impressions qu'ils font sur

nos sens, l'étendue et le mouvement, c'est-à-dire les modifications, avec le temps, du repérage dans l'étendue. Pour eux le mouvement n'est rien de plus : un déplacement par rapport à des repères avec lesquels, à l'origine de la modification, se trouve en contact l'objet qui ultérieurement s'en sépare et s'en trouve distant.

D'où le principe de l'indépendance et de la relativité des mouvements.

Il n'y a donc plus d'objets qualitativement distincts les uns des autres, au point de vue *sensible*. Il n'y a qu'une Nature unique, désensibilisée, qui, par ses modifications intelligibles, produit la diversité des apparences sensibles.

L'énergétisme a posé au contraire des énergies différentes, pour correspondre à des classes de phénomènes, différant précisément par les impressions qu'ils font sur nos sens : énergie d'élasticité et de poids, pour la sensibilité musculaire, de forme et de volume pour la sensibilité tactile et visuelle, de chaleur pour la sensibilité thermique, etc. Bref, les formes d'énergie se différencient chacune d'après des impressions sensibles déterminées. L'énergétisme tient à cette différenciation, parce qu'elle lui permet de ne pas dépasser l'expérience, de ne rien chercher au-dessous de nos sensations. Mais nos sensations s'apparentent nécessairement à notre conscience, à notre moi, à notre subjectivité. Par elles nous revenons en deçà de la réduction que le mécanisme a poursuivie, précisément pour des fins objectives.

V

L'unité de l'énergie et ses difficultés.

Y a-t-il un moyen de conserver les avantages de l'objectivité, sans être entravés par la construction intelligible que le mécanisme substituait à l'expérience sensible ?

Il y a bien un premier procédé qui se présente tout naturellement, c'est de considérer, que sans être l'étendue, ni la figure, ni le mouvement, un agent unique produit par ses propres modifications (et non point comme dans le mécanisme par les modalités de ses impressions sur nos sens) la diversité des manifestations que leurs lois nous obligent à distinguer. Les énergies se transforment les unes en les autres selon des rapports constants. Ne peuvent-elles dès lors être considérées comme des manières d'être de l'énergie fondamentale, de l'énergie tout court ? C'est bien vers cette solution que s'oriente Ostwald sans jamais l'énoncer d'une façon absolue et définitive. Car son sens scientifique très averti, et très sûr, l'avertit qu'il y a à l'assimilation de l'énergie calorifique aux autres formes de l'énergie une difficulté insurmontable : elle se comporte d'une manière tout autre que les autres énergies, parce qu'elle ne peut pas se transformer *intégralement* en travail, ni en aucune autre forme de l'énergie, dans les limites de l'expérience du moins (1) ; et au contraire, toutes les autres, oui.

C'est ce qui introduit nécessairement la fonction de Clausius et la notion d'une direction d'Univers, d'une tendance vers une *fin*. Si l'on y réfléchit, on peut, pour ce mot, passer du sens de terme ultime au sens finaliste, puisqu'il faut assigner à l'état final les caractères d'équilibre, d'homogénéité et de nivellement.

Malgré cette spécificité particulière de l'énergie calorifique et la subordination à celle-ci du principe de Carnot qui fait en quelque sorte corps avec elle, Ostwald nous représente chaque forme d'énergie, la chaleur y comprise, comme le produit de deux facteurs. Ces deux facteurs se répondent en quelque sorte dans chacune des formes de l'énergie. L'un est un facteur de capacité, formé de parties homogènes,

(1) Le 0 absolu étant en dehors de ces limites.

les unes aux autres, comme toute quantité scalaire. Les parties par suite s'additionnent les unes avec les autres, en toutes proportions. Le poids en est l'image la plus vulgaire et la plus expressive, dans l'énergie gravifique. L'autre facteur, de nature beaucoup plus qualitative, a toujours la forme subjective d'une *intensité* (tandis que le premier facteur est une *extensité* analogue à un volume matériel ou à un poids dont les parties se divisent ou se réajoutent de façon indéfinie) ce second facteur ne peut être que repéré sur une échelle. Mais les divisions de l'échelle ne sont pas les multiples ou les diviseurs les unes des autres. La température en est l'image et la plus frappante, dans l'énergie calorifique.

Deux poids égaux à 10 mètres de haut n'auront jamais que 10 mètres de chute ; et ils n'auront pas la même valeur énergétique qu'un seul de ces poids à 20 mètres de haut. Il y a en somme entre les nombres qui représentent les capacités d'énergie, et ceux qui représentent leur tension une différence analogue à celles des nombres qui comptent soit les vibrations des notes, soit leurs intervalles musicaux. Deux coureurs et deux coureurs mettent quatre hommes en course. Deux coureurs arrivés deuxième ne font pas un premier. Dans un cas, l'augmentation, le passage d'un nombre à un autre plus grand, se traduit par une extension, un plus grand étalement de capacité, dans l'autre par une plus forte tension, une augmentation interne de pouvoir.

Il n'en faut certes pas conclure, comme l'ont fait des philosophes trop pressés, que les intensités ne se mesurent pas. Elles se mesurent autrement. Nous pouvons mesurer la vitesse, la température, comme la hauteur d'un son. Nous savons définir une vitesse double d'une autre, une température double d'une autre, un intervalle double d'un autre. Seulement tandis qu'un objet affecté d'une certaine vitesse, d'une certaine température, ajouté à un autre objet

affecté de la même vitesse et de la même température font deux objets et ainsi de suite, leur vitesse, leur température restent les mêmes. Elles n'ont pas doublé. Pour les doubler, il faut procéder autrement que par l'addition des objets qui n'en sont en quelque sorte que le support. Un litre d'eau à 10 degrés et un autre à 20 degrés ne font que deux litres, mais à 15 degrés et non à 30.

En nous reportant aux distinctions que l'on fait d'ordinaire entre les différentes classes d'énergie, nous pouvons dresser les tableaux suivants :

Tableau d'Ostwald.

Energies	*Extensités.*	*Intensités.*
Volume	Volume	Pression
Forme (élasticité)	Déplacement vectoriel	Force correspondante
Pesanteur (ou gravitation)	Poids	Potentiel de gravitation
Energie de mouvement	Masse	Vitesse au carré
Electricité	Charge électrique	Potentiel électrique
Energie chimique	Masse	Affinité
Energie thermique	Entropie	Température

Tableau usuel (Jean Perrin, Urbain, etc.).

Elastique	Volume	Pression
d'allongement	Longueur	Force
de torsion	Angle	Couple
Mécanique	Déplacement	Force
Cinétique	Entropie (changée de signe)	Température absolue
Apermique	Quantité de mouvement	Vitesse
Surface (capillarité)	Surface	Tension superficielle
Electrique	Charge	Potentiel
de gravitation	Masse	Potentiel

Cette identité de composition de toutes les énergies, sur laquelle a tant insisté Ostwald, les rapproche singulièrement les unes des autres. Elle ne les identifie pas, puisqu'on peut maintenir la spécificité qualitative de chaque modalité énergétique, et la spécificité qualitative de chacun des facteurs. Mais si nous

observons la façon dont toute énergie se révèle à nous en créant à ses dépens du travail mécanique : ce qui est sa fonction, puisqu'elle se définit comme capacité de travail, nous arrivons encore à une analogie profonde sur laquelle Ostwald a également attiré notre attention. Une énergie ne travaille qu'à condition que son facteur d'intensité abaisse son degré d'intensité. Un poids pour travailler doit se rapprocher du centre de gravité. Son niveau par rapport à ce centre, sur les courbes d'égale gravité, doit s'abaisser : « Pour qu'il se passe quelque chose, il faut qu'on ait quelque part des différences d'intensité (pression, niveau, température) non compensée ». Singulier parallélisme établi ici entre toutes les formes d'énergie. Ne mettrait-il pas en échec ce que nous disions tout à l'heure de la spécificité irréductible de l'énergie thermique, avec son singulier privilège à rebours ? Toutes les formes d'énergie tomberaient au même destin. L'abaissement sur son échelle propre du facteur d'intensité, dans toutes, poserait la même condition d'une modification naturelle, d'une production de phénomènes.

Et alors les expressions, si en vogue un moment, comme celle de la dissipation ou de la dégradation d'énergie, et qui méritent d'ailleurs d'être conservées avec quelques précautions, car elles expriment une réalité physique et objective, si on les entend comme il faut, ces expressions nous acheminent bien vers l'unité d'une énergie, de nouveau « disqualifiée », si l'on peut dire, et qui dans des apparences diverses dues à la diversité de nos sens, tout comme le mouvement et la figure dans l'étendue une et homogène du mécanisme, produit, de même façon, le spectacle de l'Univers. Elle le crée en suivant une loi progressive de nivellement.

Certes, il reste toujours dans cette conception des éléments qui heurtent notre idéal d'objectivité. Nous y reviendrons, dans nos conclusions. Mais dès à pré-

sent nous pouvons dire qu'un nivellement progressif entraîne une dénivellation originelle maxima. Cette dénivellation maxima ne paraît pas pouvoir être rejetée dans le temps à l'infini, en arrière de nous, car le nivellement total serait aujourd'hui un fait accompli. Il faut donc une création déterminée, à un moment déterminé, et une création qualitativement caractérisée, puisqu'elle a placé à l'origine l'entropie minima, et la dénivellation maxima, un état particulièrement instable, un état de déséquilibre qui s'achemine à mesure, en se stabilisant, vers un état d'équilibre final, vers une fin. Mais, à cela près, nous avons quand même un état de l'énergétisme beaucoup plus objectif que l'énergétisme qualitatif de Duhem. Et on pourrait entrevoir des biais pour essayer de rendre plus objective encore nôtre conception, pour éliminer les limitations et la finalité que nous venons d'entrevoir.

Or la question ne s'est pas posée, car le système n'est soutenable que de la façon assez vague sous laquelle l'a présenté Ostwald : une assimilation de toutes les énergies au point de vue de la possibilité de leur décomposition en deux facteurs ; le caractère intensif de l'un de ces facteurs par opposition au caractère strictement extensif de l'autre ; enfin une analogie dans les modalités de leur action qui exige toujours une dénivellation non compensée. Ostwald a toujours maintenu à côté de cette vue générale la conception purement thermodynamique du principe de Carnot, ce qui entraîne le maintien de la spécificité de la chaleur, par rapport aux autres modes d'énergie. Et en cela, toute la physique lui donne raison.

Mais, c'est cette spécificité qualitative de la chaleur qui est gênante au point de vue d'un idéal d'objectivité. Une seule tentative a été faite pour la réduire : celle de M. Selme. Et bien qu'elle aboutisse à un échec technique, elle a, au point de vue psychologique, son importance. Elle décèle merveilleusement

ce besoin d'objectivité, ressort premier de la connaissance scientifique, au sein même de l'énergétisme.

VI

La réaction de Rankine : La reconcentration de l'énergie. Son échec.

Quelle est la raison dernière qui empêche d'assimiler sur le terrain scientifique l'énergie calorifique aux autres formes de l'énergie ? Il faut maintenant insister sur une différence remarquable, sur laquelle nous n'avons pas jusqu'ici attiré l'attention, car elle était indifférente aux problèmes que nous étudions. Pour le présent problème, au contraire, elle devient centrale.

Dans les formes de l'énergie autre que l'énergie calorifique, le facteur d'extensité se conserve. Il est constant. Il y a un principe de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'électricité, du volume, etc. Au contraire, pour l'énergie calorifique, il y a augmentation continue du facteur d'extensité qui est l'entropie. D'après le théorème de Clausius, elle tend, dans toute transformation naturelle, vers un maximum. Et c'est la cause éminente de la spécificité de l'énergie calorifique. C'est ce qui fait qu'elle n'est pas intégralement interchangeable avec les autres formes de l'énergie et qu'il y a une évolution unilatérale dans tout processus où elle intervient.

Cette position particulière de l'énergie calorifique, pouvons-nous essayer de la faire disparaître ? Il est facile de voir qu'ici la tendance vers l'anéantissement des spécificités pour réaliser une objectivité plus complète porte à chercher une hypothèse logique au delà de l'expérience classique : Nous entendons par là l'ensemble admirablement cohérent des expériences d'où est sortie la thermodynamique, et dont les conclusions, dans la phase de l'histoire des idées où nous en sommes, n'avaient jamais encore été dé-

menties (1). La tendance est de nouveau si impérieuse, l'idéal des physiciens modernes s'impose avec tant de poids, que sans attendre les conclusions auxquelles nous conduira la belle construction de la théorie cinétique des gaz, et sur le terrain même de l'énergétique, M. Selme cherche à tourner la difficulté, due à la spécificité de la chaleur.

Il le fait, conformément à la méthode énergétiste, en posant un principe qu'un grand nombre d'expériences justifie d'ailleurs, toutes celles qui concernent des formes d'énergie autre que la calorifique : le principe général de la conservation des « extensités ». Il faut donc essayer de montrer que l'entropie, en réalité, ne tend pas vers un maximum, qu'il y a non pas croissance, mais bien conservation de l'entropie.

Le caractère mathématique de la fonction, les difficultés que nous avons vues à propos de son établissement pouvaient, au premier abord, paraître favoriser cette entreprise. Rappelons-nous en effet la manière dont a été établi primitivement le principe de Carnot. Il a été établi à propos d'un cycle de Carnot, composé de modifications *réversibles*, et, par suite, complètement réversible lui-même. Or si, pour un cycle de ce genre qui nous représente la limite idéale, inaccessible, d'une transformation de chaleur en travail et le maximum théorique absolu du rendement d'une telle transformation, on écrit la fonction de Clausius, la valeur de cette fonction reste constante. L'entropie s'est donc *conservée*, dans l'espèce idéale du cycle de Carnot, et il nous est permis de parler dans le cas d'un cycle de transformations *réversibles*, mais dans ce cas seulement, d'un principe de conservation de l'entropie analogue à celui de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, ou de l'électricité.

(1) Elles le seront ensuite par l'existence expérimentale des fluctuations, comme nous le verrons ultérieurement et par l'expérience classique qui sert d'étai à la théorie cinétique des gaz.

Est-il possible d'universaliser la réversibilité, c'est-à-dire de considérer l'irréversibilité, comme une apparence et la réversibilité comme seule réelle ? Les transformations irréversibles recouvriraient en somme superficiellement des transformations fondamentalement réversibles. C'est la pensée de M. Selme. Nous verrons tout à l'heure les difficultés de cette solution et ce qui a forcé à la rejeter sur le terrain scientifique. Mais, pour le moment, remarquons le bien : au point de vue philosophique, il y a là un effort de toute première importance, et qui marque une tendance foncière de l'esprit,un leit-motiv psychologique qui reparaît toujours, dès que nous étudions ou critiquons la science physique : la tendance à supposer une réversibilité foncière et universelle. Et c'est sur quoi l'histoire des théories physiques contemporaines nous forcera à revenir.

Rankine, à qui nous devons la première distinction entre le facteur d'extensité et le facteur d'intensité de l'énergie, avait déjà considéré que la dissipation de l'énergie due à la dénivellation progressive du facteur d'intensité ne pouvait se présenter que dans certains processus évolutifs partiels,dans ceux des systèmes qui deviennent caducs et se dégradent, comme un organisme qui vieillit. Mais à ces processus évolutifs correspondraient, si nous envisageons l'Univers dans sa totalité, des processus en sens contraire qui constitueraient une compensation aux premières : des processus d'embryogénie, pour ainsi dire, opposés aux processus de caducité. Ainsi les cellules se dédoublent d'abord en organismes soumis petit à petit à la dégénérescence et au vieillissement, puis se recombinent ensuite en un seul et nouvel organisme régénéré. Si l'expérience terrestre, la seule que nous ayons à notre disposition, nous fait assister à la croissance, à une création continue, de l'entropie, c'est-à-dire à la dégradation de l'énergie, c'est que notre terre fait partie d'un système qui se trouve évoluer dans sa phase

vieillissante ou caduque. Cette caducité aurait son terme, non dans une fin absolue, mais dans une fin relative qui sera susceptible d'un processus inverse de régénérescence, opposé à celui de la dégénérescence. Cette hypothèse qui est plausible a le grave inconvénient de s'opposer à toute notre expérience,—thermodynamique du moins, — et d'être purement gratuite. Nous ne connaissons, même de la façon la plus vague, aucun processus de régénérescence. Certes avec le mécanisme, nous ne connaissions pas plus le mouvement perpétuel cyclique supposé par la théorie cinétique, sinon comme la seule explication hypothétique plausible des propriétés des gaz. Mais nous nous approchions d'autant plus — avec un pendule par exemple — de ce mouvement perpétuel, que nous éliminions les résistances apportées par les artifices insuffisants de nos humaines constructions. Nous pouvions construire l'expérience idéale et théorique qui, en somme, est le grand procédé technique de notre savoir, et, en mathématiques, le ressort même de la science : sa condition de possibilité, comme de perfection. Sans insister ici sur le point de vue méthodologique, il y a là une loi générale de nos procédés de connaissance, légitime en droit, justifiée en fait par la réussite. Il y a dans le réel quelque chose qui se prête et se soumet à cette loi.

Or, dans l'hypothèse de Rankine, rien de semblable. En amenuisant l'expérience, nous ne trouvons aucun indice d'un processus d'involution opposé à l'évolution que nous constatons. Toute évolution d'un système thermodynamique isolé nous fait assister à une croissance de l'entropie.

Mais,on peut prévoir qu'en s'engageant sur une voie nouvelle, on arrivera au résultat poursuivi par Rankine : ramener l'irréversibilité à la réversibilité, non plus d'une façon cyclique, mais d'une façon permanente comme nous ramenons la qualité à la figure et au mouvement. Voilà la voie suivie par M. Selme. Il

s'agit en somme de réduire l'irréversibilité, et finalement de la nier au profit de la réversibilité.

Pour retrouver un caractère d'universalité plus objectif que la spécificité, Ostwald cherchait à remonter, dans toutes les transformations de toutes les énergies quelles qu'elles soient, à une même loi d'irréversibilité. Ici toutes les énergies se comportent de même, et leurs lois ont des analogies qui rétablissent aussi une universabilité objective. Mais, en plus, disparaît le caractère d'évolution unilatérale de toutes les énergies, caractère qui, lui aussi, par le *terminus a quo* et le *terminus ad quem* qu'il introduit, fait échec à l'effort vers une parfaite objectivité. L'énergie calorifique se comporterait de même que l'énergie mécanique. Elle présenterait les mêmes chances de transformations réversibles. Comme dans le mécanisme classique, l'indépendance complète de l'objet, vis-à-vis de tout facteur qui appellerait ou qui rappellerait quelque chose de subjectif, est affirmé d'une façon universelle. Il peut y avoir retour éternel.

VII

La tentative de Selme.

Meyerhoffer avait déjà soutenu, — en s'appuyant sur la façon dont est établie la fonction de Clausius, — que la création continue d'entropie se réduirait à une vérité algébrique. Elle ne serait pas une réalité physique. Mais, vraiment, le terrain n'est pas solide. La tentative n'est à retenir que pour prévenir les généralisations philosophiques aventurées qui voient au contraire dans le principe de Carnot la protestation de la réalité elle-même, contre les vues de l'esprit et les moules logiques dans lesquels la raison voudrait, pour sa propre satisfaction, la faire entrer.

C'est sur de tout autres raisons que M. Selme appuie son interprétation. Et de façon assez subtile pour qu'elle ait pu sourire à quelques physiciens, et

séduire d'abord un esprit aussi averti que celui de Le Dantec.

L'œuvre de M. Selme est double. D'abord il montre que le principe de Carnot tel qu'il est établi pour les modifications réversibles s'applique à toutes les énergies, et qu'à proprement parler il ne faut pas parler des énergies, apparences qualitatives sensibles d'un anthropomorphisme superficiel, mais de l'énergie. Ensuite il s'efforcera d'établir que la chaleur n'est pas une forme d'énergie moins noble que les autres (puisqu'elle n'est, comme les autres, que de l'énergie tout court), et que s'il y a *pour nous*, *hommes*, inutilisation partielle de l'énergie utilisable, et transformations irréversibles, il n'y a *dans la nature* ni dégradation d'énergie, ni irréversibilité réelle.

La méthode de M. Selme rappelle celle de Duhem. Il veut constituer la thermodynamique sur le type de la géométrie et de la mécanique rationnelle sans appel apparent à l'expérience. Il y a des vérités purement rationnelles dont un corps de science peut se déduire. C'est le point de vue extrême de l'énergétisme et nous le soulignons ici pour bien montrer que nous restons avec l'auteur en plein sur le terrain énergétiste ; c'est sur ce terrain que nous cherchons à retrouver ce qui est purement objectif.

Le principe de conservation de l'énergie et le principe de Carnot sont alors deux théorèmes de dynamique générale.

VIII

Déduction a priori des principes de l'énergie.

En affranchissant « la mécanique du préjugé selon lequel la matière perceptible est seule objective », on *déduit*, par les seuls moyens de l'analyse vectorielle, ces deux principes des principes généralisés de la dynamique et des équations canoniques de Lagrange. « En mécanique, un système isolé, un système qui

pourrait être considéré comme soustrait à toute dépendance de son entourage, aurait une énergie totale, somme de son énergie potentielle et de son énergie cinétique, constante.

« En thermodynamique, on considère de même un système idéal que l'on suppose isolé de toute ambiance. Quelles que soient ses modifications, un tel système ne produit aucun travail, puisqu'aucun corps n'agit sur lui, de même qu'il ne peut agir sur aucun. D'autre part, il ne peut absorber aucune quantité d'énergie puisqu'il n'y a aucun corps qui puisse lui en prendre ou lui en céder. Dès lors... quelle que soit la modification éprouvée par un système isolé, l'énergie totale (interne et physico-chimique) du système reste invariable ». C'est le théorème de la conservation de l'énergie.

Lorsqu'un système « subit une série de transformations constituant un cycle fermé, il y a un rapport constant entre : d'une part la valeur numérique du travail effectué contre les forces extérieures, et d'autre part la valeur numérique de la chaleur qu'il absorbe... Ce rapport est indépendant de la nature du système, des modifications qu'il subit et du sens dans lequel s'accomplit le cycle... Il est indispensable que le système décrive bien un cycle fermé ». Et M. Selme critique les expériences par lesquelles on a cherché à vérifier la constance de ce rapport, « comme si ce rapport n'était pas constant *a priori* ».

La constance de ce rapport, démontré comme un théorème de mécanique, n'est autre que le principe d'équivalence entre la chaleur et le travail.

Pour M. Selme, la démonstration opéristique de ces principes, comme théorèmes, en partant d'une mécanique axiomatique, où l'on ne s'appuie que sur les propriétés générales des quantités scalaires et vectorielles, a pour objet d'assurer l'objectivité parfaite des principes, ainsi soustraits à tout subjectivisme expérimental, ou à tout arbitraire méthodologique.

Toute modification est de l'ordre d'un travail, au sens où ce mot est pris en mécanique, c'est-à-dire au sens que lui donne Lagrange dans le principe des travaux virtuels. Mais on généralise ce terme. On l'emploie de même façon qu'en mécanique, mais en l'appliquant à toutes les grandes classes de phénomènes physico-chimiques que l'énergétisme a différenciées comme énergies spéciales. L'équation du travail comprend alors une série de termes, qui tous sont les produits d'une force généralisée par une variable indépendante. Ces variables sont les *extensions* ou facteurs de capacité tels que nous les avons déjà définis en parlant de l'énergétisme d'Ostwald. Les forces généralisées qui leur correspondent sont les *intensités* ou tensions. En d'autres termes, les différentes quantités d'énergie sont les produits des variations des extensions par les intensités et c'est cette somme de produits qui, d'après le principe de conservation de l'énergie, doit être constante dans un système isolé. On reconnaît encore ici la méthode fondamentale de Duhem.

Les extensions sont, dans l'interprétation de M. Selme, toutes *conservatives*. C'est dire qu'elles restent constantes, invariantes dans un système absolument isolé : la masse, la quantité d'électricité, la quantité de mouvement, le volume, etc. Il est évident, par exemple, que si le volume d'une partie du système diminue, l'autre partie augmente d'une quantité égale, lorsque le système a un volume total constant.

IX

Conservation de l'entropie.

M. Selme s'est efforcé d'arriver à cette conclusion d'une façon purement démonstrative, donc objective. Le détour qu'il emploie à cette fin est purement technique et aprioristique. Il revient en somme à dire ceci : en formant certaines fonctions des coordonnées

et des vitesses des systèmes décrits d'une façon purement géométrique, on peut, en partant des équations fondamentales de Lagrange, écrire que des grandeurs déterminées, dites « moments généralisés », par rapport aux coordonnées sont invariantes sous certaines conditions. Ce sont ces moments qui sont susceptibles, dans ces conditions déterminées, de représenter les extensions. Celles-ci sont donc conservatives.

Ce premier résultat, M. Selme prétend le démontrer *a priori* comme un théorème de dynamique généralisée. Dès lors il s'appliqnerait à toute expérience en tant que forme mathématique générale. Il aurait une très grande importance. L'entropie est une extension. L'entropie serait donc invariante et conservative comme la quantité de mouvement, ou la quantité d'électricité. La contradiction est formelle avec le principe de Clausius. Tout se passe donc comme si nous n'avions jamais affaire en fin de compte qu'à des cycles de Carnot, et à des modifications réversibles. Comme on voit, la chaleur serait destituée de son rôle de forme spécifique, exceptionnelle de l'énergie. Elle ne différerait pas qualitativement des autres formes que nous connaissons et son facteur d'extensité, l'entropie, loin de s'accroître dans toute modification due aux seules forces intérieures d'un système isolé, et de tendre vers un maximum, se conserverait comme tout facteur d'extensité. Le principe de conservation de l'entropie qui a été établie par Carnot pour un cycle d'opérations ne comportant que des modifications réversibles (M. Selme interprète même le « calorique » dont parle Carnot, dans le sens d'entropie, exégèse sur laquelle il y aurait d'ailleurs à revenir), reçoit ici, sous le nom de principe de Carnot, une extension universelle. Et il est débarrassé de tous les commentaires de Clausius qui en sont considérés comme une perpétuelle déformation.

On voit combien est important, pour le but que se propose M. Selme, de faire du principe de la conser-

vation de l'énergie un simple théorème de mécanique généralisée, démontré en dehors de tout appel à l'expérience, et s'imposant à toute expérience. Ainsi lui est-il permis d'affirmer la validité universelle d'un principe de conservation de l'entropie, à la limite,envers et contre toute expérience,mais sous des conditions que remplit toute expérience. La méthode aprioristique est ici capitale, car c'est par elle que nous sommes inévitablement conduits à nous demander si l'expérience des modifications irréversibles qui est patente, est réelle ou apparente, et à conclure en ce dernier sens.

X

Principe de Carnot, principe de conservation.

Cette méthode va nous amener à poser le principe de Carnot d'une façon purement objective, en le démontrant également comme un théorème de mécanique, valable universellement et nécessairement pour toute forme de l'énergie.

Jusqu'ici nous ne sommes pas sortis de la pure analyse mathématique, en l'espèce le plus souvent de l'analyse vectorielle (1). Le monde physique pourrait ne pas exister. A condition seulement pour la pensée géométrique de former certains systèmes de grandeurs, et de nommer ces quantités du nom des énergies qui déterminent l'état du système,de nommer certains facteurs de ces quantités, les variables d'état ou variables indépendantes, du nom des extensions, les autres du nom des intensités en les considérant

(1) Nous sommes obligé d'employer ici quelques termes techniques sans pouvoir songer à les expliquer (il faudrait tout un cours d'analyse et de mécanique, mais cela importe peu). Nous voulons simplement donner l'impression que la méthode est exclusivement mathématique et qu'il s'agit de démonstrations *a priori*, *more geometrico*. Les résultats et conclusions, qui seuls importent, au point de vue d'une signification précise, seront énoncés en langage ordinaire.

comme des forces généralisées, à condition, enfin, d'en déduire certaines expressions géométriques dont l'analyse et la mécanique nous fournissent le type, nous démontrons le théorème de la conservation de l'énergie, les théorèmes de conservation, d'invariance, des extensions. Nous allons de même démontrer le théorème dont la conclusion est le principe de Carnot.

Si nous reprenons la représentation des modifications d'un système par des quantités vectorielles, on démontre (pour des vecteurs bien définis dans un champ en fonction des trois coordonnées de son origine, mais M. Selme admet qu'il est possible de le démontrer d'une façon générale) que tout vecteur peut être considéré comme la résultante de deux autres vecteurs : l'un qui admet un potentiel uniforme dit irrotationnel, l'autre qui n'admet pas de potentiel, dit rotationnel. Ces deux genres de vecteurs peuvent prendre une signification physique bien remarquable, si l'on considère les états d'un système physique comme représentés par des points figuratifs contenus dans un espace fictif dont les dimensions représenteraient les *extensions* du système. Cet espace représentatif se laisse diviser alors en deux domaines : la région des vecteurs qui admettent un potentiel : c'est la région des modifications *réversibles* ; et la région des vecteurs rotationnels qui représentent les liaisons dissipatrices de l'énergie, les résistances passives, bref les modifications *irréversibles*.

Or ces deux sortes de vecteurs, « très différents, n'ont qu'une seule particularité commune : *le sens du vecteur est toujours dirigé vers les potentiels décroissants* ». « Que le vecteur soit une accélération, un vecteur de pression, un vecteur thermique, un vecteur de champ électrique ou magnétique, permanent ou en mouvement, le point matériel, le volume, l'entropie, la charge électrique ou le pôle sont mus dans le sens où les potentiels décroissent. Toute extension

tend ainsi à passer des hauts aux bas niveaux... Toute forme d'énergie tend à passer des endroits où elle a une intensité élevée à ceux où elle en a une moindre ; tous les phénomènes naturels sont dus à ce que des différences de potentiel déterminent des changements dans le sens de l'annulation de ces différences, de l'égalisation de ces quantités différentes ».

« Clausius, en ce qui concerne la chaleur seule, avait tenté de tirer la proposition énoncée... de la remarque suivante : la chaleur ne peut passer d'elle-même sur un corps plus chaud. Mais, outre que cette dernière remarque, ainsi énoncée, prête à de nombreuses objections, parce qu'elle manque de précision, elle n'a pas la généralité de l'énoncé qui est valable pour toute intensité et qui est déduit des théorèmes de la mécanique rationnelle, au lieu de consister en une simple remarque de faits. L'énoncé correct est le suivant : « *Lorsqu'un système monocyclique* [M. Selme entend par là un système où ne varie qu'une forme de l'énergie, quelle qu'elle soit d'ailleurs] *parcourt un cycle fermé, il ne peut faire passer une quantité quelconque d'extension d'un niveau d'intensité à un autre plus élevé sans dépense de travail mécanique ou sans qu'il y ait dans un autre système passage d'extension d'un niveau d'intensité à un autre qui lui soit inférieur.*

« *Il résulte de là qu'un système monocyclique décrivant un cycle fermé ne peut être moteur*, c'est-à-dire ne peut fournir du travail, *que* 1° *s'il est en rapport avec au moins deux niveaux d'intensité correspondant à la forme d'énergie en jeu, et que* 2° *si une certaine quantité de cette énergie est transportée à l'un de ces niveaux d'intensité : le plus bas seul* »...

« La température n'est pas une intensité à part et le principe de Carnot, tel que Carnot l'a énoncé, a une portée générale qui s'étend à toute forme d'énergie.

« Les déductions exagérées que l'on a faites sur la

dégradation de l'énergie, l'illusoire considération d'énergies dites nobles et le fait de ravaler la chaleur au rang d'une énergie de rebut, tombent dès que le principe de Carnot est repris dans la véritable acception que lui a donnée son génial auteur (1) ».

En d'autres termes, dans les équations du travail, les intensités, toutes les intensités, sont représentées par des vecteurs dont la propriété commune est d'être dirigés vers les potentiels décroissants. C'est dire qu'ils ne peuvent varier, si le système est isolé, que dans le sens d'une intensité toujours moindre. Toute énergie ne rend d'elle-même du travail que par sa chute d'un niveau d'intensité à un niveau plus bas.

Ainsi l'entropie, d'après les démonstrations de M. Selme, et par une nécessité rationnelle, se conserverait, comme tous les facteurs « extensions » des énergies ; et la dénivellation s'exercerait sur tous les facteurs « intensités » dès qu'il se produirait une modification physico-chimique, et pour qu'il se produisît cette modification.

Que deviennent alors les notions d'irréversibilité et de dégradation de l'énergie ? c'est-à-dire le rôle qualitativement exceptionnel de la forme d'énergie : chaleur ?

XI

Apparence de l'irréversibilité.

Il semble de suite qu'il ne puisse y avoir de réelle irréversibilité. Puisque l'énergie est constante, qu'elle est la somme des produits des facteurs extension et intensité, que les extensions sont elles aussi constantes, il doit toujours y avoir compensation des dénivellations : au total, dans un système clos, elles doivent se balancer. Et nous voilà revenus au retour

(1) Selme, *Principe de Carnot contre Principe de Clausius*, p. 45, 46, 47 de l'exemplaire dactylographié.

éternel du mécanisme : l'Univers peut repasser une infinité de fois par les mêmes états. Toutes ses modifications constituent un cycle fermé, comme celles de l'Univers cartésien. Il y a compensation constante dans la somme des modifications.

Et c'est bien la conclusion à laquelle arrive M. Selme et qu'il prétend démontrer directement.

Admettre, dans tous les cycles réels, l'inégalité de Clausius, c'est-à-dire la croissance de l'entropie au lieu de son invariabilité, et considérer au contraire que celle-ci ne peut être admise que pour un cycle idéal et irréel, c'est « démontrer qu'une différentielle exacte n'en est pas une (1) ». Cette démonstration paradoxale tiendrait à la façon dont nous analysons le détail des phénomènes irréversibles. « La réversibilité existe dès que nous savons trouver des facteurs intégrants (2) ». Et M. Selme s'efforce de nous convaincre que « la région des phénomènes irréversibles (des vecteurs rotationnels et des tourbillons) peut être rendue négligeable *autant qu'on le veut* (3) ».

« Un mécanisme, agencement de solides invariables susceptibles de mouvements relatifs, lorsqu'il est en mouvement, abandonné à lui-même, soustrait à toute action extérieure, se mouvrait indéfiniment, comme l'énonce le théorème des forces vives. Ce serait un perpétuel mobile ; tels paraissent être les corps célestes, les courants électriques dans les métaux à la température de l'hélium liquide ou dans les aimants à la température ordinaire. Tout mécanisme, imparfaitement soustrait aux actions extérieures, lorsque nous le jugeons sommairement, livré à lui-même, reste soumis à des liaisons ; s'il finit toujours par s'arrêter, c'est parce qu'il a à vaincre la résistance de l'air et d'innombrables résistances passives (des frottements

(1) Selme, *Ibid.*, p. 52.
(2) *Ibid.*
(3) *Ibid.*

agissant sur lui), c'est parce que son énergie cinétique fuit dans l'ambiance, s'y dissémine à l'état de trépidations, de bruit, d'ondes diverses d'élasticité rayonnante ou à l'état de remous d'air, de tourbillons de lubrifiant ; c'est enfin parce que les solides qui composent le système ne sont pas invariables, subissent des changements de texture, s'échauffent, s'électrisent, etc... Le théorème des forces vives n'est pas en défaut ; les conditions qu'il suppose ne sont pas fournies.

« Ces cas d'échauffement et d'électrisation nous amènent au dogme de l'accroissement d'entropie dans les ... systèmes isolés. Il y aurait là création d'entropie, comme il semble naître une certaine masse d'électricité (1) ».

Comme on voit, M. Selme, d'une part assimile à l'accroissement d'entropie l'accroissement des autres énergies, dans des conditions données, notamment l'accroissement de l'énergie électrique, accroissement équivalent à une quantité d'énergie mécanique disparue ; et d'autre part, il considère qu'il n'y a là qu'un phénomène apparent dû à l'imperfection de nos machines, c'est-à-dire à une interprétation anthropomorphique et utilitaire des phénomènes. Cette interprétation n'est pas objective et ne peut s'appliquer à la nature elle-même. Elle n'est valide que si nous déformons artificiellement la nature pour réaliser des dispositifs répondant à certains de nos besoins. Mais cette déformation elle-même est, en dernière analyse, toute subjective. Elle consiste à négliger certaines fuites qui par rapport au but cherché sont ou indifférentes ou nuisibles. Si au lieu de considérer isolément et *in abstracto* nos artifices, nous les replaçons dans la nature, si nous ne les considérons plus comme un empire dans un empire, bref si, au lieu de les considérer subjectivement, nous nous efforçons de

(1) *Ibid.*, p. 56.

les considérer avec une entière objectivité, tout change. La chaleur et l'entropie n'ont plus aucune particularité spéciale. Elles sont l'une, une énergie, comme toutes les autres, l'autre un vecteur-extension de l'énergie, comme tous les autres.

XII

Universalisation de cette apparence.

Dans un autre chapitre, M. Selme s'attache à montrer que dans toute transformation d'énergie, quelle qu'elle soit, aussi bien de travail en chaleur que de chaleur en travail, et même d'énergie cinétique en travail, et inversement, il y a *en apparence* dégradation de l'énergie, dissipation de l'énergie, bref irréversibilité et impossibilité de convertir toute l'énergie de sa première forme dans la seconde. Cette apparence est due, comme dans le cas classique de la transformation de la chaleur en travail et de l'inégalité de Clausius, à l'*imperfection* de nos appareils tout uniment.

« Nombreux sont les cas d'irréversibilité apparente qui se changeraient en phénomènes réversibles, si l'on ne se donnait la peine de prendre quelques dispositions très simples en vue d'amoindrir les énormes amortissements que l'on constate. Il en est ainsi de la diffusion des corps dissous dans leurs solvants et de la diffusion des gaz. La diffusion n'est une opération irréversible que lorsque notre négligence rend la réversibilité impossible. Il suffit de s'arranger pour qu'il y ait constamment état d'équilibre (sans faux équilibre) (1) ».

« Toute énergie se dissipe, cherche à s'évader des ergastules où l'homme veut la tenir en esclavage profitable. Elle se soustrait à l'emprise humaine en se morcelant, se subdivisant jusqu'à pouvoir glisser à

(1) *Ibid.*, p. 75.

travers les mailles de nos réseaux... Cependant ce qui est perdu pour nous ne l'est pas pour la Nature. Tout ce que nous lui laissons lui retourne. Et puis, s'il est certain que toute énergie potentielle tend à se changer en énergie actuelle comme toute fortune tend à se nouer en satisfactions positives, il est non moins vrai que toute énergie cinétique est sujette à amortissement et à faux équilibre.

« Il se prépare ainsi de nouvelles formes d'énergie potentielle, comme les dépenses des prodigues enrichissent les économes...

« Le raisonnement qui consiste à dire : « Le monde va lentement, mais sûrement (il y a longtemps qu'il va ainsi) vers un état de complet équilibre » n'a qu'un défaut tout anthropomorphique, c'est de considérer le monde abstraction faite du milieu où il est plongé. Le rayonnement et la dissipation de toutes les ondes centrifuges régénèrent peut-être l'énergie potentielle de gravitation d'où toute chaleur est née. En tout cas, il ne faut pas prendre l'Univers pour le petit monde des agitations humaines actuelles, petit monde confiné dans le bas-fonds de l'atmosphère terrestre » (1).

XIII

Conclusions de M. Selme.

En somme le raisonnement de M. Selme revient à ces propositions générales. Toutes les formes d'énergie sont équivalentes (il n'y en a pas de plus nobles que d'autres). La dissipation de l'énergie est inévitable quand nous voulons *par une machine* capter de l'énergie ; mais dans la nature l'énergie est toujours compensée.

« Quand on nous dit qu'une sorte de direction fatale oriente dans un sens invariable tous les changements d'état que subit un système faisant croître

(1) *Ibid.*, p. 79 et 80.

sans cesse son entropie » (préface de M. P. Duhem à la Thermodynamique de M. Marchis), nous nous rappelons qu'une sorte de direction fatale oriente aussi certains résultats du calcul, lorsque ce calcul s'applique à des données fournies par notre négligence ou notre impuissance à analyser les faits. L'irréversibilité exprime uniquement l'imperfection de nos moyens, comme le hasard traduit notre ignorance de la complexité infinie des causes et des effets. ...Donc, la non nullité des transformations non compensées n'est due qu'à une apparence masquant des modifications ordinaires, mais imperceptibles. Cette illusion s'évanouirait si nos moyens d'investigation nous donnaient le pouvoir de sonder plus profondément le détail des phénomènes. Lorsqu'on dit : « il a été perdu de l'énergie utilisable par suite d'une irréversibilité », on doit l'entendre dans le même sens que lorsqu'on dit : « Nous avons perdu du temps ». Rien n'a été perdu que notre bonne volonté (1) ».

Reste une dernière différence essentielle qui est marquée par la thermodynamique traditionnelle entre la chaleur et l'énergie. On peut dans les autres énergies faire varier les facteurs du produit extension par intensité, dans le sens où l'extension décroît pour laisser croître l'intensité : « Une quantité d'énergie potentielle de liquide pesant étant donnée sous forme de grande masse d'eau à faible hauteur de charge, on sait la convertir en énergie d'une faible masse à très grande hauteur ; cela n'est pas plus difficile que de réaliser l'opération inverse. D'une puissance électrique livrée à bas voltage pour une forte intensité de courant, on sait retirer au moyen de transformations appropriées une puissance à peu près équivalente se présentant comme très petite intensité de courant à un voltage élevé, aussi bien que l'on sait faire l'inverse. Pour la puissance élas-

(1) *Ibid.*, p. 63 et 64.

tique d'un gaz, mêmes possibilités réciproques, si l'on prend les précautions que le bon sens suggère ; il importe que l'entourage immédiat se trouve équilibrer le gaz donné (1) « de même qu'un mobile peut communiquer à un autre de masse moindre et aussi parfaitement élastique, une vitesse supérieure à la sienne (2) ». Et M. Selme de nous proposer à l'appui un modèle de « bélier thermique » analogue au bélier hydraulique. Conclusion : « on augmente la température aux dépens de l'entropie, comme on augmente des volts aux dépens des coulombs ou une pression aux dépens d'une masse (3) ». « Le son nous offre un exemple frappant d'excitations thermiques qui ruinent l'assertion selon laquelle la chaleur ne pourrait que descendre (4) ». Finalement M. Selme affirme que les températures peuvent être groupées en série, être montées en tension les unes *au-dessus* des autres, comme des générateurs électriques dont le couplement en série augmente la différence de potentiel, c'est-à-dire le voltage utilisable, comme une pompe peut refouler l'aspiration d'une autre pompe et porter l'eau au-dessus de 32 pieds. « *Si l'on ne réussit pas à chauffer un four en se bornant à « entasser » des boules de neige, on y parvient néanmoins lorsqu'on sait s'y prendre de manière rationnelle* (5) ».

M. Selme croit pouvoir alors dire pour ces conclusions définitives : « On doit à Carnot le principe d'équivalence entre la chute d'entropie d'une température élevée à une moindre température et le travail correspondant. Il désignait l'entropie sous le nom de calorique et il ne confondait pas avec chaleur.

« D'après sa théorie, il y a disparition d'énergie thermique chaque fois qu'il y a communication déplaçant l'entropie entre corps à des températures différentes, tout comme il y a disparition d'énergie de

(1) *Ibid.*, p. 77. — (2) *Ibid.*, p. 70 et 71. — (3) *Ibid.*, p. 73. — (4) *Ibid.*, p. 74. — (5) *Ibid.*, p. 77.

pesanteur chaque fois qu'il y a communication déplaçant la masse entre des quantités de liquide pesant à des niveaux différents. L'égalisation des températures donne lieu à une conversion partielle de chaleur en énergie non thermique, comme l'égalisation des niveaux donne lieu à une conversion partielle en énergie d'autre sorte que l'énergie de pesanteur.

« Peu importe en quelle sorte d'énergie est convertie l'énergie initiale, peu importe que la conversion soit opérée par un système décrivant des cycles de Carnot parfaits ou qu'elle soit opérée par un système gaspillant toute l'énergie, système uniquement conducteur par exemple. Peu importe même que le système soit un système à affinité chimique. L'énergie donnée subit toujours une conversion liée à la chute de potentiel. Dans tous les cas il y a une énergie dissipée dite non compensée, empêchant le rebondissement au-dessus de l'état stable...

Mais toujours « l'énergie dissipée captée dans l'ambiance aura pu subvenir au rétablissement de l'énergie potentielle, à un rendement près (1) ».

« La formule empirique de Clausius, traduite par l'inégalité fameuse d'où est sortie la fausse notion d'accroissement d'entropie, n'est qu'un trompe-l'œil, tout au plus une recette pour praticiens (2) ». « Le principe de Carnot est inattaquable, c'est un principe parfait, tandis que la thèse de Clausius n'est que la traduction de l'infirmité de nos sens (3) ».

C'est donc bien le retour éternel, la possibilité du retour éternel que proclame M. Selme et sur le terrain même de l'énergétisme. Son effort a été précisément de modifier celui-ci dans ce sens, d'y substituer à l'idée d'orientation de tous les phénomènes, sur une pente bien déterminée, l'idée de retour éternel.

C'est manifestement (presque toutes les lignes des

(1) *Ibid.*, p. 87.
(2) *Ibid.*, p. 1.
(3) *Ibid.*, p. 83.

dernières citations que nous avons faites le proclament) pour donner à l'énergétisme un caractère objectif complet, pour le dépouiller de tout anthropomorphisme tiré des applications de la science, pour remplacer la machine par l'Univers,mieux pour réintégrer celle-ci dans l'Univers, bref pour éviter tout caractère utilitaire, pragmatique de la science, que M. Selme veut revenir au principe du retour éternel.

Quelle que soit la valeur scientifique de cet effort — et nous verrons qu'il aboutit finalement à un échec — sa valeur philosophique et psychologique, sa valeur pour une théorie de la connaissance, en un mot sa valeur épistémologique est considérable. C'est un cas-type, un fait privilégié.

Il montre l'emprise du concept, l'inquiétude à laquelle il répond dans l'esprit, son rôle organisateur, voire structural de la pensée scientifique.

Il le montre d'autant mieux que c'est par un détour, plus peut-être, par une entorse aux méthodes scientifiques, que s'opère ici dans l'énergétisme le rétablissement de l'idée de retour éternel. Il a fallu forcer la signification des faits expérimentaux pour l'obtenir et c'est maintenant que nous devons entreprendre, de façon aussi rapide mais aussi nette que possible, la critique des conceptions de M. Selme.

En fait, elles ont été écartées par tous les physiciens et par la physique contemporaine. Elles ne pouvaient pas ne pas l'être.

XIV

Critique : gratuité des hypothèses fondamentales.

Comment, en effet, interpréter l'accroissement d'entropie que présente cependant l'expérience ? Comme on interprète, répond M. Selme, l'accroissement apparent de la quantité d'électricité : « des électriciens ne confondent pas la charge ou masse d'électricité libre (et variable selon le diélectrique)

avec la quantité d'électricité vraie qui seule est invariable. Les thermodynamistes [partisans de la création continue d'entropie] ne veulent pas reconnaître qu'il existe aussi une entropie apparente ou grossière et une entropie vraie que Poincaré avait nommée entropie fine, cette dernière seule étant constante (1) ».

Or, c'est ici que nous entrons alors dans la voie des hypothèses arbitraires : de celles qui tombent directement sous le coup de l'accusation dirigée constamment par les énergétistes contre le mécanisme. Seulement l'attitude de M. Selme s'aggrave encore de ce qu'il se place, lui, sur le terrain méthodologique de l'énergétisme : qu'il veut nous donner, comme eux, une description purement déductive et rationnelle des phénomènes, sans faire des hypothèses de structure. Dans le mécanisme l'hypothèse de structure a trois raisons pour lui donner raison. Elle est une méthode de découverte, elle généralise des expériences partielles, qui sont son point de départ ; enfin elle vise toujours à un accord ultérieur avec l'expérience. Elle ne prête le flanc à la critique que lorsqu'elle prétend imposer à l'expérience une structure, que celle-ci la confirme ou ne la confirme pas : et alors les mouvements et les masses cachés, c'est-à-dire les hypothèses arbitraires, entrent en jeu. Sa deuxième et sa troisième raison ont disparu.

Or,les hypothèses de M.Selme sur la conservation de l'entropie sont précisément de ce dernier ordre. Elles sont inventées pour forcer l'expérience qui y répugne, à cadrer avec une déduction *a priori*. Cela est si vrai, que M. Selme nous propose deux moyens, au choix, de concilier sa déduction, plus précisément sa thermodynamique rationnelle, avec l'expérience : « 1° quand il apparaît de l'entropie ou des coulombs dans un système où il *semblait* n'en pas exister auparavant,

(1) *Ibid.*, p. 58.

cela *peut être dû* (1) à ce que cette entropie ou ces coulombs, *invariables de quantité*, ne deviennent perceptibles que *parce que l'intensité où ils sont portés devient assez haute* pour leur faire franchir un seuil minimum de perceptibilité ou d'action sur nos instruments » ;

« 2° Quand il apparaît de l'entropie ou des coulombs dans un système qui *semblait* en être dépourvu, *cela peut* provenir *de ce qu'il disparaît quelque extension dans une quantité d'énergie mécanique du système*, cette extension étant remplacée par une extension thermique (entropie) ou une extension électrique (coulombs) correspondant à d'équivalentes quantités d'énergie ».

Dans le premier cas il y a conservation de chaque qualité d'extension, dans le second, conservation de l'extension en général. Comme on voit, l'affirmation de ces deux principes est absolument gratuite. Il n'y a pour l'autoriser aucune généralisation légitime à partir des faits.

Poincaré disait qu'on pouvait toujours imaginer, pour conserver un principe, un système caché construit et calculé de telle sorte qu'il compense exactement les écarts des mesures expérimentales avec les nombres déduits de l'application du principe. C'est bien ce que fait M. Selme. Là où l'expérience nous montre dégradation de l'énergie, il dit fuite invisible ; là où elle nous montre corollairement accroissement d'entropie, il dit diminution compensatrice cachée. Mais dire, ce n'est ni prouver, ni montrer. Or les faits visibles, l'expérience, comme les démonstrations à partir des faits, sont ici impuissants. Il faut supposer arbitrairement la constitution d'un système tel que les compensations indécelables, imaginées de toutes pièces, comblent exactement l'écart avec les expé-

(1) C'est nous qui soulignons l'expression où s'étale l'arbitraire que ne soutient aucune expérience.

riences, et les résultats de démonstrations qui partent d'expériences indiscutables.

Non seulement M. Selme prête le flanc à toutes les objections que l'énergétisme a adressées au mécanisme, au sujet de l'arbitraire et de l'infinité des hypothèses possibles pour compenser les mêmes écarts de la théorie et de l'expérience : objections victorieuses, décisives ; un vrai savoir ne peut s'édifier de la sorte.

Mais il renchérit encore sur ce défaut capital de l'ancien mécanisme. Celui-ci construisait ses modèles ; le calcul en déduisait les conséquences ; l'expérience était enfin comparée à ces conséquences, et à elle, méthodologiquement, appartenait la décision. Mais M. Selme nous construit un système rationnel, et c'est pourquoi nous avons insisté sur ce côté de son travail. Il démontre et implicitement il suppose que l'expérience ne peut pas contredire une *démonstration*. Tout désaccord entre elles deux se résout par l'imperfection de l'expérience en désaccord. Et,de fait,quand il nous présente des expériences, ce sont toujours des expériences idéales, conceptuelles, géométriques, dont l'expérience vraie ne peut que s'approcher, parce qu'il y a toujours des fuites, des imperfections de dispositif.

Reste à prouver que la nature est conforme à ces expériences idéales, qu'elle est un dispositif mécanique parfait. Or, c'est ce qui est affirmé, mais n'est prouvé nulle part.

Songeons aux exemples qu'il nous donne, au bélier thermique, à la possibilité, avec des machines frigorifiques, de chauffer un four à l'aide de boules de neige. Tous sont irréalisables physiquement, si l'on veut que l'entropie du système « isolé » n'aille pas en croissant, si, comme de juste, le système « isolé » comprend tous les systèmes qui interviennent à un titre quelconque dans l'expérience.

Tous reposent sur ce postulat commun : n'arriver au résultat cherché, en partant des conditions don-

nées, que par des transformations réversibles, des cycles de Carnot. Mais nous savions d'avance que si nous n'opérons que par des modifications réversibles, l'entropie se conservera. L'intégrale de Clausius sera nulle. Le tout, encore une fois, est de savoir si toutes les modifications naturelles, c'est-à-dire toutes les modifications physico-chimiques, peuvent, en faisant le bilan exact du crédit et du débit, être tenues pour réversibles. Or, c'est ce que *tous* les physiciens depuis la fondation de la thermodynamique nient absolument. Non seulement toute expérience le dément, — M. Selme ici aurait trop beau jeu de nous dire que nos expériences négligent des éléments qui, retenus, rétabliraient la balance exacte du bilan —, mais même l'expérience idéalisée, en partant des expériences réelles, le calcul et la démonstration s'accordent unanimement pour nous montrer l'accroissement de l'entropie dans toutes les transformations réelles.

Ce qui est idéal et conceptuel, ce qui ne tient pas compte en général de tous les éléments de la réalité par une abstraction commode pour le calcul certes, mais par trop schématique et simplificatrice, c'est précisément la notion de modification réversible et le cycle de transformation dit cycle de Carnot.

XV

Les idées de M. Selme ne valent que pour les transformations réversibles.

C'est ce qu'a mis particulièrement en lumière M. Michaud dans une critique aiguë et sûre des idées de M. Selme (1).

Il commence par donner raison à ce dernier en tout ce qui concerne les modifications réversibles toujours conservatrices d'entropie. Mais il montre avec force que dans toute modification irréversible, l'entropie

(1) *Revue Scientifique* (*Revue Rose*), 11-18-25 août 1917.

s'accroît. M. Selme a peut-être eu raison de distinguer le principe de Carnot du principe de Clausius c'est-à-dire du principe de la dégradation de l'énergie. Carnot avait certainement dans l'esprit une image mécaniste, cinétique, des choses, comme le montre sa découverte du principe de la conservation de l'énergie par transformations réciproques de la chaleur et du travail, son idée très ferme de la chaleur, mode du mouvement, dans les notes écrites en 1828. Carnot considérait toute transformation sur ce type réversible, sur le modèle idéal qu'il a créé pour la transformation physique : le cycle de Carnot. Mais le principe de la dissipation,mieux de la dégradation de l'énergie, le principe de Clausius (déjà esquissé, avec la réserve d'une reconcentration ultérieure de l'énergie,par Rankine), doit subsister à côté du premier pour rendre compte en général des transformations réelles.

« Il devient alors nécessaire de distinguer le principe de Carnot du principe de la dégradation de l'énergie. On peut donner à ces deux principes les énoncés suivants :

« 1° Dans les transformations réversibles l'entropie se conserve ;

« 2° Dans les transformations irréversibles, l'entropie s'accroît. Le premier ne donne à l'énergie calorifique aucun caractère particulier, le second exprime le fait de l'accroissement de l'entropie dans les phénomènes irréversibles et la tendance que possèdent alors toutes les énergies à prendre la forme calorifique.

« Dans un monde où tous les phénomènes seraient réversibles, on connaîtrait le principe de Carnot, on ignorerait le principe de la dégradation de l'énergie.

« Il importe peu d'ailleurs qu'un tel monde soit imaginaire et que les phénomènes réversibles soient irréalisables. Les géomètres nous ont habitués à concevoir des lignes droites et des cercles parfaits. Les mécaniciens raisonnent, quatre-vingt-dix-neuf fois sur cent, comme si les frottements n'existaient pas.

Ce qu'ils étudient les uns et les autres, ce sont des cas limites, imaginaires, débarrassés de toutes les complications inhérentes au réel.

« Les thermodynamistes doivent, de même, s'habituer à concevoir le cas limite de la réversibilité. Leurs pensées évoluent dans un monde imaginaire dont le monde de la mécanique sans frottement n'est d'ailleurs qu'une région particulière.

« Avant d'étudier un phénomène dans tous ses détails et toute sa complexité, il faut en abstraire le phénomène simplifié, réversible, correspondant (1) ».

« D'une façon générale on peut dire que, lors des transformations irréversibles, c'est l'entropie vraie qui s'accroît. Si l'on découvrait un procédé permettant de mesurer l'entropie indépendamment de sa définition énergétique [c'est-à-dire de la mesurer expérimentalement et non d'une manière purement déductive et mathématique], on ne pourrait, sans aucun doute, que vérifier par des mesures plus directes sa loi de croissance dans les transformations irréversibles (2) ».

Or, c'est le cas général. Dans les phénomènes réels, l'entropie qui apparaît après une transformation et qui se surajoute à celle qui caractérisait le système avant cette transformation n'a été puisée nulle part. Elle a bien été créée réellement. Le signe de l'inégalité doit ici nécessairement prendre la place du signe de l'égalité. Quelque chose est qui n'était pas avant, et dont on ne peut découvrir nulle part dans l'Univers l'existence antérieure.

« Bien peu de physiciens se laisseront convaincre que lorsque, par exemple, un fil conducteur s'échauffe par le passage d'un courant électrique, l'entropie qui apparaît ainsi n'est pas de l'entropie réellement créée. Où se trouve la source froide d'où cette entro-

(1) Michaud, *loc. cit.*, p. 495-496.
(2) *Ibid.*, p. 492.

pie serait puisée pour être cédée par le fil à une température plus haute ? Invoquera-t-on un changement d'état du conducteur ? Il serait bien peu perceptible pour être passé jusqu'ici complètement inaperçu (1) ».

La construction de M. Selme qui arrive à placer toutes les énergies sur le même rang ne résiste donc pas à l'examen dès qu'on entre dans le domaine de l'irréversibilité. Et on y entre dès qu'on se trouve en présence de transformations réelles.

On doit conclure : ce qui est apparence en somme, et illusion, par défaut d'analyse intégrale des phénomènes, bref, abstraction c'est, sur le terrain de l'expérience, en partant des idées thermodynamiques, la réversibilité. Un phénomène réel complet, en partant de ces mêmes idées, est irréversible et obéit à l'inégalité de Clausius.

C'est ce qui est évident dans la conduction où la température se nivelle, pendant que de la chaleur passe du corps plus chaud au corps plus froid. Il y a là création d'entropie, avec conservation d'énergie calorifique, puisqu'il y a invariance finale du produit de l'entropie par la température.

Pour M. Selme il y a au contraire conservation d'entropie, et diminution du produit par suite d'une transformation d'une partie de l'énergie thermique en d'autres formes, à cause de la viscosité du conducteur, de son hystérisis et des frottements, en transposant ces expressions par rapport à l'énergie thermique.

M. Selme est revenu souvent sur le fait de la conduction. Il a senti que c'était là le point critique de sa théorie. Il s'efforce d'établir (2) que « la conduction a les mêmes lois que la diffusion, elle s'exprime par les mêmes équations, elle représente une sorte de filtration. Que devient le travail de la résistance passive ?

(1) *Ibid.*, p. 493.
(2) Selme, *op. cit.*, p. 58.

Le travail de la résistance ohmique se retrouve dans la chaleur de Joule. Comme il n'y aurait pas d'accroissement de la quantité de chaleur du fait de la conduction thermique, selon Clausius, le travail correspondant donnerait un dégagement d'entropie. C'est comme si l'on disait que le frottement d'un sel dans le solvant fait apparaître de la solution (1) ». « Il y a irréversibilité chaque fois que, pour une énergie quelconque, il se produit une chute de potentiel, conduisant vers une définitive égalisation. Il y a alors transformation de ladite énergie en d'autres formes qui sont utilisées ou laissées à l'abandon d'une dissipation ... Lorsque nous disons : les cas d'irréversibilité sont seuls réels, nous devons préciser que ce soi-disant réel est de l'apparence toute brute, de l'illusoire non analysé de la perception très sommaire, une sorte de première approximation très vague de la réalité concrète. Ce réel vulgaire n'est pas celui qui doit faire l'objet des sciences exactes ». Bref « chaque fois que dans un système il semble exister une apparition d'entropie, nous pouvons affirmer que le système dit isolé ne l'est qu'en imagination. Il propage de l'énergie ailleurs. L'infini est toujours laissé hors des enclos trompeurs de nos systèmes et le plus habile capteur d'énergies ne peut jamais avoir à sa disposition qu'une dérivation d'un grand courant naturel (2) ».

Tel serait le cas de la conduction, si l'on oublie de faire rentrer dans le système des résistances spéciales à la propagation de la chaleur.

Mais on voit de suite que c'est cette singulière conclusion, rejetée par tous les physiciens, au nom de toute l'expérience, qui est purement conceptuelle, idéale et illusoire. Nous retombons toujours sur le même vice radical de méthode : l'appel à l'arbitraire invisible, que n'a jamais décelé aucune expérience,

(1) Selme, *op. cit.*, p. 58.
(2) *Ibid.*, p. 62.

pour faire cadrer les résultats de toutes les expériences avec la théorie. On peut même aller plus loin. On peut dire que l'expérience ne décèlera jamais des faits du genre de ceux auxquels fait allusion M. Selme. Nous savons dans trop de cas dresser des bilans dont l'exactitude est approchée presqu'autant qu'on le veut. Il nous faudrait altérer ces bilans eux-mêmes, en invoquant des transformations intermédiaires aussi arbitraires que cachées.

Il est vraiment plus simple de suivre l'expérience, tout uniment : c'est le plus clair et le plus utile de l'effort de l'énergétisme. Ne perdons pas, dans les constructions nouvelles, ce gain méthodologique incontestable de tout le mouvement de pensée que nous avons analysé ici. Surtout ne perdons pas ce précieux avantage sur l'ontologisme *a priori* du mécanisme traditionnel : Ne construire nos théories que pour l'expérience, et non torturer l'expérience ou y ajouter arbitrairement pour confirmer nos théories. Nous pouvons le dire sans dépasser la pensée de la physique contemporaine, l'analyse de M. Selme aboutit finalement à un échec.

Mais elle n'a pas été sans mérite. Elle a eu, à notre sens, entre autres, celui d'attirer l'attention sur la différence initiale entre les transformations réversibles et les transformations irréversibles, et de montrer, contrairement aux affirmations de la thermodynamique traditionnelle et des énergétistes militants, que la chaleur n'est vraiment pas une forme spécifique d'énergie, et qu'il n'y a dégradation de l'énergie que dans le domaine de l'irréversibilité. C'est d'ailleurs un large domaine. C'est le domaine du réel, en général. C'est l'Univers de nos expériences et de nos machines, du moins en première apparence, en apparence globale comme nous verrons bientôt.

D'après la thermodynamique traditionnelle, emportée, par son élan, comme il est naturel, dans sa critique du mécanisme, de la *pensée mécaniste* surtout,

plus loin qu'il ne convenait, « l'énergie calorifique, même dans le cas des transformations réversibles, apparaîtrait comme une forme inférieure, dégradée de l'énergie. Essayons de montrer qu'il n'en est rien. Pour cela plaçons-nous par la pensée dans un monde où tous les phénomènes seraient réversibles. Il est entendu, par conséquent, que non seulement les machines thermiques que nous considérerons seront réversibles, mais encore qu'elles seront alimentées de façon réversible, c'est-à-dire que l'entropie fournie à la source chaude ne sera, en aucun cas, de l'entropie créée, provenant, par exemple, de la combustion du carbone ; ce sera de l'entropie puisée irréversiblement autre part...

« Plaçons d'abord une machine thermique, parfaitement réversible, entre deux sources primitivement à la même température et actionnons mécaniquement cette machine. Elle refroidira une des sources et échauffera l'autre ; c'est l'analogue d'une machine électrique qui chargerait un condensateur. Laissons maintenant la machine fonctionner en sens inverse, le système reviendra à l'état initial et restituera intégralement l'énergie mécanique qu'on lui a précédemment fournie. Enfermez le tout dans une boîte close, personne ne pourra deviner si l'énergie mécanique que vous emmagasinez dans cette boîte est employée à créer une différence de température ou à tendre un ressort ».

« Une machine thermique dont une des sources est constituée par le milieu extérieur est analogue à une machine électrique dont un des pôles est au sol. Cette dernière permet, suivant le sens dans lequel on l'activera, d'élever un corps à un potentiel positif ou négatif quelconque. De même, la première permet d'échauffer ou de refroidir réversiblement un corps (1)

« On peut imaginer un dispositif thermique ana-

(1) Michaud, *op. cit.*, p. 494.

logue à une pile de concentration, réaliser une pile thermique de gravitation. « Le parallélisme entre l'énergie calorifique et l'énergie électrique peut être continué très loin... Il n'est pas jusqu'aux phénomènes électromagnétiques, qui ne puissent trouver leur analogue thermodynamique (1) ». De même que l'énergie électrique peut être considérée comme une énergie potentielle, et l'énergie magnétique, comme l'énergie cinétique correspondante, l'énergie rayonnante peut être regardée comme l'énergie cinétique d'une énergie potentielle qui n'est autre que l'énergie calorifique. Nous avons alors des oscillations thermiques absolument analogues aux oscillations électriques.

Finalement l'énergétique, *dans le domaine de la réversibilité*, peut écrire des équations fondamentales absolument générales, d'où se déduisent *identiquement* par simple changement de sens des lettres, les équations particulières à chaque forme de l'énergie, la chaleur y comprise. Toutes ces équations sont parfaitement symétriques.

Dans le domaine de la réversibilité, donc, la chaleur se comporte *comme* toutes les autres formes de l'énergie. Elle n'a plus de privilège à rebours : la dégradation de l'énergie est inconnue, dans tout ce domaine. Et ceci était utile à bien marquer, car des ouvrages excellents comme celui de Bernard Brunhes (2) ne mettent pas suffisamment cette remarque essentielle en lumière. Toutes les conclusions de Brunhes comme celle du Dr Gustave Le Bon dans l'*Evolution de la matière* et l'*Evolution des forces*. « Rien ne se crée tout se perd » ne sont valables que pour les transformations irréversibles. Nous savons du reste que le champ de ces transformations c'est, en première approximation du moins, tout notre Univers réel.

(1) *Ibid.*, p. 494 et 495.

(2) B. Brunhes, *La dégradation de l'énergie*, Bibliothèque de philosophie scientifique, Paris, Flammarion, 1908.

Mais il faut tout de même admettre la réserve que nous avons faite, car nous allons voir avec la théorie cinétique des gaz, cet Univers se doubler d'un Univers qui le sous-tend, est aussi réel que lui, puisqu'il ne fait qu'un avec lui, qui, aussi bien que lui,nous est révélé par l'expérience et qui n'admet plus la même irréversibilité.

XVI

Les idées d'Arrhenius sur l'évolution des mondes.

Bien d'autres essais à prétentions moins amples ont été tentés pour sortir de la tendance au repos éternel, et retrouver le retour éternel, sur le terrain de la thermodynamique pure. Tous ont échoué. Mais leur valeur aux points de vue psychologique et philosophique est toujours de montrer l'effort vers une loi de retour éternel, liée au besoin d'objectivité intégrale, marque essentielle de la période que la science a inaugurée avec la Renaissance.

Il faut faire dans ces essais une place à part aux idées du grand savant suédois Svante Arrhenius sur l'évolution des mondes. Elles réalisent, dans la poursuite de l'objectivité, un avantage considérable. Elles montrent la possibilité de restaurer la qualité de l'énergie, de tenir en échec sa dégradation, tout en respectant le principe de Carnot, c'est-à-dire tout en se maintenant sur le terrain de la thermodynamique. Mais si elles évitent au principe cette conséquence que l'énergétisme lui a trop vite voulu lier d'une façon nécessaire et universelle, elles ne peuvent passer outre à la conclusion que Clausius a tirée de l'œuvre de Carnot et qui, nous venons de le confirmer, fait aujourd'hui corps avec elle : l'accroissement de l'entropie dans le monde réel. Si donc il y a un pas de fait vers le retour éternel, en ce sens que les systèmes astronomiques sont capables de retrouver, pour ainsi dire, leur qualité énergétique, ce rehaussement n'est que re-

latif et temporaire quelle que soit l'énormité des temps ainsi gagnés. La marche par accroissement final d'entropie vers le repos éternel, pour être retardée, n'en est pas moins fatale.

Les idées d'Arrhenius supposent acquis les principes relatifs à la théorie cinétique des gaz — que nous allons bientôt examiner — et la théorie moléculaire de la matière. Mais principes et théories n'y interviennent que d'une façon très large et le raisonnement se développe sur le terrain de la thermodynamique. Nous pouvons donc l'exposer ici, sans anticiper sur la suite. C'est bien en effet un moyen de sauver — sous les réserves que nous venons de faire, donc partiellement — le retour éternel et de satisfaire au besoin d'objectivité. La tentative du reste est d'autant plus nette en ce sens qu'Arrhenius a bien cru un instant qu'il avait trouvé le moyen de mettre en échec avec la dégradation constante d'énergie, le théorème de Clausius sur l'accroissement de l'entropie, et rencontrer vraiment le retour des choses. Elle n'en garde pas moins un intérêt, car dans les limites où elle doit être enfermée, elle permet la possibilité de cycles cosmiques partiels.

Si les gaz sont constitués par des molécules matérielles,en mouvement désordonné (1),il est de ces molécules, même aux températures les plus basses, qui sont animées de très grande vitesse. Dans certaines circonstances rares, mais pourtant nécessaires aux régions les plus hautes de l'atmosphère d'un astre, région où l'attraction du centre de gravité de l'astre devient très faible,où les gaz ne sont plus que les gaz les plus légers, et sont entièrement raréfiés, si bien que le choc réciproque des molécules est lui-même très rare, les molécules à grande vitesse, dirigées à l'opposé du centre de l'astre, doivent s'échapper de l'atmosphère et de la

(1) Comme il est à peu près certain, ainsi que nous le verrons à la fin de ce travail.

sphère de gravitation de l'astre. Dans les nébuleuses où la gravité est très faible, le phénomène doit se produire sur une grande échelle.

Or ces molécules à grande vitesse et à grande force vive se comportent une fois isolées comme des projectiles dont le choc, quand elle rencontre une autre atmosphère nébulaire ou astrale, la réchauffent nécessairement. La chaleur peut donc ici passer d'un corps plus froid, une nébuleuse très froide, à un corps plus chaud, un astre, qui reçoit ces molécules. D'une façon plus générale, ce processus qui doit être la règle commune pour les nébuleuses, amène une élévation de température par rapport aux régions très froides où il a son origine.

Avons-nous enfin un procédé cosmique universel de reconcentration de l'énergie, de « *gradation* » de cette énergie, opposée à la dégradation de Clausius, et qui nous permette d'envisager ce pour quoi d'une façon psychologique et philosophique il a été conçu par Arrhenius : le retour éternel (1).

Pas plus que dans les diverses tentatives plus ou moins avouées, dont nous avons jusqu'ici pris connaissance.

M. Berthoud (2), par un calcul assez compliqué, mais incontestable, a montré que la migration des molécules hors d'un champ de gravitation entraîne nécessairement un accroissement d'entropie, et obéit au théorème de Clausius, si l'on tient compte de la variation de volume de l'ensemble originel de toutes les molécules considérées : le volume de ce système, qui ne comprend au moment initial de notre observation qu'une atmosphère astrale ou une nébuleuse, doit être étendue ensuite aux limites où nous saisissons les molécules migratoires, au moment final de l'observation.

(1) Arrhenius, *L'évolution des mondes*, p. 207.
(2) *Journal de Chimie physique*, 1919, p. 616.

La thermodynamique reste sauve, car si nous avons un moment fait intervenir la considération d'une molécule individuelle, nos conclusions n'en portent pas moins sur des ensembles moléculaires d'une immense complexité. L'individu ici c'est bien encore le système : les nébuleuses ! et non les molécules isolées.

Arrhénius (1) pourrait ne pas se tenir pour battu. Il a conçu un autre processus cosmique pour contrebalancer la conclusion de Clausius. Il est plus complexe et ne peut guère être exposé sans appareil mathématique. Voici à peu près son allure fondamentale.

D'après des théorèmes bien connus de thermodynamique, une masse de gaz, en se refroidissant, diminue de volume, se contracte. Mais en se contractant, elle se réchauffe. Voilà deux processus antithétiques qui, partiellement, peuvent se compenser. Les nébuleuses sont des masses de gaz qui réalisent un état d'équilibre particulier qu'a bien étudié la thermodynamique : l'équilibre adiabatique. Quelles vont être pour elles les conséquences des théorèmes que nous venons de rappeler. Deux nébuleuses à température différentes étant suffisamment voisines pour qu'il y ait entre elles échanges de chaleur, conformément aux principes de la thermodynamique, la plus chaude rayonnera vers la plus froide et lui communiquera une certaine quantité de chaleur. Seulement le calcul montre ici que la nébuleuse la plus chaude se contractant à mesure que, par rayonnement, elle perd de la chaleur, continuera à s'échauffer *plus* qu'elle ne se refroidit par une sorte de compression interne. L'autre au contraire, en recevant les molécules de la première se dilatera, et cette dilatation comme une détente, abaissera sa température, *plus* qu'elle ne s'échauffera par rayonnement.

Le résultat qu'impose le calcul dans les circons-

(1) *Id.*, p. 210.

tances très particulières où sont les masses de gaz qui constituent nos deux nébuleuses, c'est que l'écart des températures, par suite des échanges nécessaires de chaleur entre elles, ira s'augmentant, au lieu de se niveler. Et cela, conformément au principe de Carnot. Poincaré a montré que c'est le nivellement (1) qui, ici, serait contraire au principe.

Mais on voit immédiatement que, conformément aussi à la thermodynamique classique, le théorème de Clausius est satisfait : l'entropie a augmenté, puisque de la chaleur est passée de la source chaude sur la source froide.

Le repos éternel, quoique retardé, n'est pas éliminé. Le retour éternel n'est assuré que localement, dans certaines parties de l'Univers. L'entropie de l'Univers tout entier, à supposer qu'on en puisse parler comme d'un système clos entre deux états d'équilibre initial et final, à supposer que l'énergétisme et Clausius aient eu le droit de l'envisager ainsi, ne s'en accroît pas moins constamment. Et avec l'augmentation de son entropie, l'Univers s'achemine au repos éternel.

XVII

Résumé et conclusions.

En résumé, l'énergétisme traditionnel a, au point où nous en sommes, abouti à cette conclusion. *L'Univers réel est un domaine d'irréversibilité.* Il ne peut donc y être question de retour éternel. Tout au plus doit-il y être question d'une marche *sans fin*, vers une nivellation croissante des températures, avec une augmentation progressive d'entropie. *Sans fin*, car d'abord les nivellements mettront à se faire un temps de plus en plus grand à mesure que les différences de températures deviendront plus petites, un

(1) *Thermodynamique*, p. 256.

temps admettant l'infini pour limite, comme l'a bien montré H. Poincaré. *Sans fin* encore, car le 0 absolu est une limite asymptotique placée à l'infini par la façon même dont est établie l'échelle thermodynamique des températures qui, *seule*, le fait apparaître ; car les intervalles de température ou degrés sont des *rapports* et non des quantités absolues.

Toutes les tentatives pour faire rentrer dans l'énergétisme l'idée de retour éternel, pour aboutir à un Univers réversible, sur le terrain de la thermodynamique échouent devant l'expérience.

Mais l'esprit mécaniste avait depuis longtemps déjà imaginé une théorie, la théorie cinétique des gaz, qui, par les immenses développements qu'elle a reçus dans ce dernier cinquantenaire, et qu'elle a continué à recevoir chaque jour, allait faire voir sous un jour nouveau la thermodynamique elle-même, et rétablir, avec le concours de l'expérience, l'idée de retour éternel. C'est ce mouvement de pensée qu'il nous reste à analyser. Et c'est par le détour de la théorie cinétique des gaz, la négation d'une irréversibilité foncière, la réduction de l'irréversible au réversible, comme du désordre à l'ordre : D'un désordre où le jeu des combinaisons, à lui seul, peut et doit faire ressortir l'ordre, si rares que soient les combinaisons qui ramènent de l'ordre.

DEUXIÈME PARTIE

LE RETOUR AU RETOUR ÉTERNEL

LIVRE PREMIER

LES MOYENNES ET LES APPARENCES GLOBALES

CHAPITRE PREMIER

LA THÉORIE CINÉTIQUE DES GAZ

I. — La raison du recul de l'énergétisme sur le terrain scientifique.
II. — Le retour de l'atomistique.
III. — Le point de départ de la théorie cinétique des gaz.
IV. — Les moyennes et la théorie cinétique.
V. — La première étape de la théorie : théorème de distribution des vitesses de Maxwell.
VI. — Les gaz parfaits.
VII. — La seconde étape : les différences de structure moléculaire.
VIII. — L'équipartition de l'énergie.
IX. — La troisième étape : les gaz réels.
X. — L'équation de Van der Waals.

I

Les raisons du recul de l'énergétisme sur le terrain scientifique.

Est-ce pour des raisons théoriques que l'énergétique, après un moment de vogue, a cédé la place à une tradition nouvelle qui se développe avec le XXe siècle et qui, malgré des différences profondes, a plus d'affinités, certes, avec le mécanisme antérieur qu'avec elle. Nous ne le croyons pas.

Comme toujours dans l'histoire de la physique, depuis la Renaissance, ce sont des motifs expérimentaux qui ruinent une théorie et amènent à en édifier une autre. On peut même dire qu'avec l'histoire de la physique, les causes qui changent la physionomie, l'attitude théorique de la science, sont de plus en plus d'ordre expérimental. Elles le sont presque uniquement dans le dernier stade qu'il nous reste à parcourir.

Certes les raisons philosophiques se retrouvent toujours sous les raisons scientifiques. Il est certain que la recherche de la « chose » que représentait l'énergie n'était pas suffisante pour donner une signification réaliste à toutes nos lois physiques. Elle pouvait à la rigueur soutenir un exposé, un récrit mathématique élégant de certains ensembles ; tout ce qu'on rapportait à la thermodynamique, au premier rang : les rapports de la chaleur et du travail, quelle que soit la source originaire de ce travail, les changements d'état, la mécanique chimique. Mais elle était insuffisante pour faire comprendre les phénomènes physiques, surtout ceux qui sortent du cadre de la thermodynamique : les phénomènes d'ordre cinétique, et les phénomènes électro-magnéto-optiques dont l'importance relative grandissait de plus en plus en physique par rapport au reste.

Quant à la théorie de la connaissance qui sous-tend l'énergétisme positiviste et pragmatiste, redisons-le, elle n'a jamais été admise par les physiciens que jus-

qu'à un certain point. Qu'il ne faille pas donner un sens ontologique à toutes les représentations, surtout aux détails des représentations, qu'il faille dire en gros pour reprendre sous une autre forme plus générale l'aphorisme de Pascal : ceci se comprend à peu près, à l'aide de telle ou telle représentation, — d'accord. Mais qu'il soit vain de réaliser substantiellement ces représentations, surtout dans les détails destinés à interpréter tel ou tel résultat des mesures expérimentales, qu'il soit futile de croire que les choses puissent être ce qu'une très grossière et superficielle approximation nous autorise à les supposer pour la commodité des recherches et de leur groupement, c'est ce que personne n'a jamais sérieusement contesté. Un modèle, une illustration, une image directrice ne sont pas des choses. Elles aident à comprendre ; elles restent très loin de connaissances, au sens plein du mot. Aussi les plus dogmatiques des savants philosophes, un Descartes, un Leibniz, un Newton, n'ont-ils cessé de multiplier les mises en garde en faveur de la positivité. Et il est toujours facile, en choisissant quelques textes, de faire de tous les savants des positivistes purs.

Que certains insistent dans ce sens et en arrivent même comme Mach, et comme les énergétistes positivistes ou pragmatistes, à vouloir se passer de toute hypothèse figurative, c'est encore un fait historique qu'on rencontre, tantôt plus accusé, tantôt moins à toutes les époques de la physique. Et heureusement, c'est, en somme, l'esprit critique en acte. Son utilité est incontestable. Il est fécond parce qu'il nie, et par ce dont il débarrasse. Lorsque le sol est empierré, plein de racines mortes, comme au moment des grandes défaillances des théories ossifiées par une vaine scolastique, il paraît alors presque comme la seule attitude possible. C'est ce qui est arrivé, avec la ruine du mécanisme traditionnel, et qui a rallié au positivisme tant de savants par probité. Mais il en restait quelques autres, tout aussi probes, qui persévéraient

dans l'autre voie (heureusement encore, car les grandes découvertes sont le plus souvent parties de là).

Pour le plus grand bien de la science donc, à proportions variables, il y a toujours eu des esprits aventureux et des esprits plus pointilleux pour leur crier casse-cou.

Il est vraisemblable qu'avec le temps et les extensions de la connaissance expérimentale, ces deux courants, au lieu d'alterner, comme ils l'ont fait, jusqu'à présent dans l'histoire de la physique, l'un recouvrant presque l'autre à certaines périodes, se mêleront de plus en plus, deviendront continus et parallèles, et même s'harmoniseront dans une même œuvre scientifique. Il faut en physique comme ailleurs ces deux genres d'esprit, qu'on ne peut guère trouver réunis en un même génie. Négateurs prudents, affirmateurs audacieux, toute l'histoire des idées oscille autour de ces deux pôles nécessaires de son axe.

II

Le retour de l'atomistique.

Le jusant énergétiste a donc fait place à un flot constructeur. Et celui-ci est actuellement au plein. Ce qui a poussé le flot, c'est l'expérience. L'origine la plus lointaine de cette poussée, c'est la théorie cinétique des gaz. Elle a continué, même pendant la plus grande vague de l'énergétisme, la tradition mécaniste. Elle l'a continuée sur le terrain de l'atomistique.

L'atomistique n'est pas, en soi, nécessairement lié au mécanisme. Les théoriciens les plus rigoureux du mécanisme, un Hertz, par exemple, ont même essayé de l'en disjoindre formellement. C'est que ces théoriciens représentaient justement la tendance critique dans la physique mécaniste. Celle-ci devait alors se construire mathématiquement dans la forme des équations de la mécanique, en laissant de côté les corpuscules, les atomes, les masses invisibles, héritage

de Galilée, de Descartes (1), de Huyghens, des Bernouilli, ou les forces centrales, les forces attractives et répulsives sorties de l'école Newtonienne. Mais dès que le mécanisme essayait de comprendre et de se représenter (ce qui est lié indissolublement à notre sens du moins) les lois ou les phénomènes physiques, il posait des points matériels, c'est-à-dire des masses élémentaires : des points relatifs s'entend, quand il s'agissait de leur donner figure réelle, donc de très petits domaines spatiaux supports de la masse, finalement des atomes. L'atome était la masse substantialisée, la réalisation des lois fondamentales de la mécanique, comme, dans l'énergétisme, l'énergie substantialisée fut la réalisation des principes de l'énergie.

III

Le point de départ de la théorie cinétique des gaz.

La théorie cinétique des gaz (2) a été créée pour interpréter et *comprendre* les propriétés des gaz, leur force élastique, c'est-à-dire les rapports du volume et de la pression, la loi de Mariotte, d'une part, puis les rapports de cette force élastique et de la température, le coefficient de dilatation des gaz, la loi de Gay-Lussac d'autre part. La première partie de l'œuvre est due surtout à Daniel Bernouilli (1730), la seconde à Joule, précisée par Clausius et Maxwell (1857-1860).

La théorie cinétique a été très discutée et du point de vue scientifique et du point de vue philosophique. Le premier ordre de discussions est précieux, car il a

(1) Pour Descartes, l'état corpusculaire de la matière était un état second produit dans un état primitif où la matière est un continu (l'espace et le plein).

(2) Nous ne voulons ici ni exposer d'une façon technique la théorie cinétique des gaz, ni en faire une vulgarisation, mais retenir seulement de cette théorie les points qui nous paraissent plus particulièrement intéresser la réflexion philosophique.

amené des précisions, des clartés graduelles dans la théorie. Il l'a débarrassée peu à peu des questions oiseuses et gênantes sur lesquelles porte principalement le second groupe. Mais d'une façon générale ce dernier se mêle au premier, même chez les savants. Et il nous semble souvent une méprise sur la signification et la valeur réelle de la théorie.

Ces questions sont faciles à reconnaître. Elles portent toutes sur la molécule ou l'atome *individuel*, leur contexture et leur forme. Il s'agit de savoir si l'on doit considérer l'atome comme sphérique ou non, comme dur ou élastique, et la différence qu'il y a entre l'infinie dureté (indéformabilité absolue) ou l'infinie élasticité (déformation suivie de la restitution intégrale de la forme antérieure, et par des voies strictement inverses à celles suivies pendant la déformation). Nous avons aujourd'hui de la molécule et de l'atome des conceptions si éloignées de celles-ci dans ce qu'elles contiennent de suggestions expérimentales, — et nous le verrons, elles en contiennent beaucoup — que nous ne comprenons pas très bien qu'on ait pu perdre tant de temps et parfois de savoir, à ces discussions. Tout ce qui, dans la théorie cinétique, se rapporte à la considération d'un élément individuel isolé, ne doit être pris que comme artifice temporaire et sans lien avec le réel. Il est intéressant parfois de suivre d'une façon mathématique cet individu de forme et de propriétés hypothétiques. Les hypothèses les plus simples, et qui entraînent immédiatement des complications énormes de calcul, sont des artifices à retenir comme tels. Mais la théorie cinétique des gaz est autre chose que cela. Elle n'aspire qu'à jeter ces béquilles. En tout cas, ne les prenons pas pour éternelles, et ayons grand soin de les ignorer, quand nous essayons de nous représenter philosophiquement son vivant organisme.

C'est le sort commun de toutes les théories scientifiques et la condition de tout progrès dans la science :

on cherche à comprendre avant que de connaître, nous voulons dire avant qu'on ait dans les mains tous les éléments nécessaires à la compréhension, si jamais, même sur la question la plus simple, on peut penser les avoir *tous*. Il faut bien alors, dans cet effort, poser arbitrairement les conditions de la compréhension, et les choisir les plus simples qu'on peut, puisqu'aussi bien nous savons qu'ils sont imaginaires. Pourquoi compliquer une charpente qui doit disparaître. La plus stricte économie y est de rigueur. Qu'à suivre mathématiquement les conséquences de ces vues simplistes, on soit amené à des difficultés inextricables, des contradictions avec l'expérience, ou des contradictions intrinsèques quand on essaye d'y mêler des vues expérimentales, cela se conçoit, cela est inévitable, nécessaire, et cela ne fait rien.

La théorie cinétique des gaz a son point de départ dans un effort vers une représentation intuitive de la structure des gaz. Les gaz ont une force élastique qui croît comme la pression. Une masse gazeuse bien définie, emprisonnée dans une enceinte dont la capacité peut varier avec les pressions que supportera cette masse, occupera des volumes qui varient en raison inverse de ces pressions. La force élastique du gaz croîtra donc en raison inverse du volume. Enfin cette masse tendra toujours à remplir le récipient qu'on lui offre, sa force élastique décroissant à mesure que la capacité du récipient croîtra. Tel est le résumé de ce que nous apprennent les travaux de Boyle et de Mariotte. Ce sont ces travaux que condense la théorie de Daniel Bernouilli. Comment se représenter la force élastique des gaz, se représenter, c'est-à-dire expliquer leurs propriétés en partant des analogies de leur nature que la loi de Mariotte venait de mettre sous tous les yeux ? Une alternative se pose : la structure des gaz est continue ou discontinue. La considérerons-nous en hypostasiant directement leur force élastique, comme continue : grossièrement un tissu

de caoutchouc, une multitude de petits ressorts en contact permanent ? A la rigueur une telle représentation pourrait rendre compte de quelques effets, entre des limites très étroites. Mais comment expliquer ainsi un comportement à peu près identique sur l'échelle indéfinie des volumes que peut prendre une masse donnée de gaz ? Comment expliquer que les gaz les plus différents en tant qu'espèces chimiques et quelle que soit leur densité, se comportent sensiblement de même au point de vue physique, d'après la loi de Boyle-Mariotte ? Une masse continue peut-elle vraiment s'étirer à ce point qu'elle occupe immédiatement, sans rupture, des volumes insensément plus grands que le volume primitif, qu'elle n'ait point, en somme de volume elle-même, n'ayant que celui du récipient, quel qu'il soit, dans lequel on l'enferme ? Et l'inverse proportionnalité constante, du moins en dessous d'une certaine pression et au-dessus d'une certaine température, entre le volume et la pression ? Et le mélange presque immédiat des gaz, quelle que soit leur densité ? Tout dans la théorie des gaz portait au contraire à une explication par le discontinu. Supposons que les gaz soient constitués par des molécules qui poursuivent leur chemin en ligne droite, tant qu'elles n'arrivent pas au très proche voisinage d'autres molécules ou des parois — voisinage infiniment proche par rapport aux distances ordinaires qui les séparent. La pression sur les parois du récipient par quoi se manifeste la force élastique est produite par les chocs de ces molécules. Elle leur est proportionnelle. Si l'on réduit le volume du récipient à la moitié au tiers, au quart, les chocs de ces molécules deviennent à tout instant évidemment deux, trois, quatre fois plus nombreux : la pression croît du double, du triple, du quadruple et ainsi de suite. Inversement, si le volume du récipient augmente du double, ou triple, ou quadruple, le nombre des chocs diminue à tout instant en même proportion et par

suite la pression. Nous avons la loi de Boyle-Mariotte.

Du même coup, nous avons la représentation remarquable de la loi de Gay-Lussac, qui d'ailleurs est liée d'une façon nécessaire à la précédente, mais qui fut d'abord trouvée (par Amontons pour l'air) et présentée isolément. Tous les gaz, à l'état parfait, c'est-à-dire suffisamment éloignés de leur point de liquéfaction comme pour la loi de Boyle-Mariotte, se dilatent de façon identique. Pour la même augmentation de température, des volumes identiques des divers gaz sous des pressions identiques s'accroissent de la même quantité. L'augmentation de volume, sous pression constante, par degré centigrade par exemple, est une constante universelle. Et puisqu'il s'agit de volumes, il est rationnel que cette loi soit liée à celle qui régit les volumes et les pressions.

Les résultats de l'expérience sont condensés, tous, dans la fameuse équation de gaz parfaits, une des plus importantes de la physique, car cela touche directement la constitution de la matière :

$$PV = RT$$

où P indique la pression, V le volume, T la température absolue, R la constante universelle qui exprime l'accroissement de volume de tous les gaz parfaits en fonction de la température, rapportée aux unités (molécule-gramme) $18{,}32 \times 10^7$ C. G. S.).

Or la théorie cinétique des gaz interprète immédiatement cette loi, si l'on regarde la température non plus comme une qualité originale des corps, une forme originale de l'énergie, mais simplement comme proportionnelle à la force vive moyenne de translation des molécules constituantes des gaz.

Nous comprenons du même coup que les gaz remplissent presque immédiatement toutes les capacités qu'on leur offre, la vitesse de ces molécules étant fort grande (de l'ordre de celle d'une balle de fusil). Nous comprenons encore leur diffusion les uns dans les

autres, ainsi que l'égalisation immédiate de leur température quand on les mélange, en les prenant à des températures différentes.

Il y a plus : cette image nous fait même toucher du doigt les irrégularités bien connues de la loi de Mariotte et de la loi de Gay-Lussac.

Tant que nous sommes à des pressions et à des températures suffisamment éloignées de celles où les gaz sont sur le point de se liquéfier, le nombre des molécules pour un volume donné est suffisamment petit. Leurs dimensions sont entièrement négligeables par rapport à l'espace où elles se meuvent. Négligeables aussi seront les forces qui peuvent s'exercer entre les molécules en dehors des chocs. Tout se passe comme si les molécules étaient des points mathématiques, sans dimensions. La loi de Mariotte s'applique donc d'une façon précise. Le volume étant réduit de moitié, la pression est portée au double.

Mais que le volume soit assez réduit pour que le volume propre des molécules devienne sensible en face du volume spatial où elles se meuvent, tout change. Le volume total n'est pas en réalité celui qui est ouvert à leur libre course. Il est réduit par la somme des volumes moléculaires, somme qui n'est plus négligeable vis-à-vis de lui. Les volumes doivent donc diminuer moins vite que la pression n'augmente. C'est bien ce à quoi l'expérience nous fait assister.

IV

Les moyennes et la théorie cinétique des gaz parfaits.

La théorie cinétique des gaz n'a aucune réalité physique, si nous la prenons comme la poursuite mathématique du destin individuel, de chacune des unités élémentaires qu'on y considère.

Elle doit être considérée comme une « forme » mathématique qui nous représente les résultantes moyennes d'une quantité immense d'actions, de faits

particuliers, dont il est impossible d'atteindre les presque innombrables individualités. Une « forme » mathématique : entendons par là un ensemble théorique qui permet de *formuler* en les reliant entre elles les lois qui nous sont apportées par l'expérience. Partant, on sera capable de calculer *a priori* les résultats des mesures expérimentales et, s'il y a lieu, des applications techniques. De ces formes mathématiques, la théorie cinétique des gaz réalise l'une des plus impressionnantes et des plus parfaites. S'élevant de suppositions, bien trop simplistes pour être réelles, sur les éléments ultimes, les molécules constitutives des gaz, et les suivant d'une façon tout aussi irréelle dans leur chemin invisible, elle arrive à retrouver avec une précision presque déconcertante toutes les lois que notre expérience, faite de résultantes si lointaines et de moyennes si grossières, nous révèle dans les phénomènes perçus à notre échelle. Toutes ces lois qui, au premier abord, ne sont que des descriptions sans lien entre elles de telles ou telles propriétés des gaz, se trouvent reliées à partir des hypothèses du départ, conçues pourtant en dehors de toute expérience. Si bien que le tissu si fin, si simple, si l'on n'en considère que les fils, si compliqué bientôt dès qu'ils s'entrelacent dans la trame, ce tissu arrive, *a priori*, à reproduire les arabesques des expériences de deux siècles, sur les objets en première apparence les plus différents. Il les enveloppe à peu près sans plis ni déchirures.

V

Le théorème de distribution des vitesses de Maxwell.

C'est d'abord le théorème de distribution des vitesses dû à Maxwell. Une hypothèse le domine et le conditionne, ou plutôt c'est l'hypothèse même — au sens que donne la méthodologie mathématique à ce

mot — du théorème : l'état de chaos moléculaire. Ce qui caractérise ce chaos moléculaire, c'est que la forme, le volume de la molécule sont en première approximation négligeables, par rapport à l'espace dans lequel elle se meut. Tout se passe comme si elle était ponctuelle, comme si elle était identique à toutes les autres d'une part, toujours identique à elle-même d'autre part, et comme si elle agissait et réagissait toujours de manière identique. Elle cède à la molécule à laquelle elle se heurte la quantité de mouvement qu'elle perd, ou lui emprunte la quantité de mouvement qu'elle gagne. Toutes les molécules sont en quelque sorte symétriques (au sens vulgaire du mot) par rapport à la quantité de mouvement, et par rapport à elles-mêmes. La figuration sphérique de cette petite masse quasi-ponctuelle, sa parfaite élasticité, ou sa parfaite dureté, ces deux hypothèses qui ont soulevé tant de critiques scientifiques et philosophiques — en particulier celle de Stallo — ne sont que des symboles, par quoi l'on exprime qu'étant donné le très grand nombre des molécules, leurs différences individuelles, leur structure interne, que nous entrevoyons aujourd'hui, sont négligeables, — comme dans les calculs du chef, les différences psychologiques individuelles du million d'hommes qui composent son armée. Ici ce million est multiplié par des millions de milliards.

La forme sphérique n'est qu'une simplification grossière, mais d'une très heureuse commodité mathématique. Elle peut signifier en somme la compensation finale de toutes les irrégularités de forme qui se retrouvent à peu près égales en influences, à cause du très grand nombre. D'ailleurs à la considérer comme le symbole de la sphère d'action immédiate (aux distances très petites du centre de gravité), elle est peut-être plus voisine de la réalité qu'on serait d'abord tenté de le croire. L'état de chaos moléculaire n'est autre chose que le concept de *gaz parfait*, dans la

théorie cinétique : l'ensemble des phénomènes physiques qu'on peut considérer comme résultant de l'intervention d'un très grand nombre de molécules quasi-ponctuelles et qui obéissent aux lois de la mécanique des corps élastiques. Dans cet ensemble, tout ce qui est individuel se réduit, par suite des compensations, à zéro, et nous ne conservons que les propriétés générales et communes.

Ce sont d'ailleurs les seules que l'expérience nous donne, car l'expérience ne porte que sur des résultantes moyennes *infiniment* éloignées (pourrait-on dire pratiquement) des particularisations individuelles, dans les conditions où peut être utilisé le concept du gaz parfait.

Il en résulte que pour les gaz parfaits, l'expérience se laisse exprimée d'infiniment près par la théorie cinétique, et qu'elle confirme d'infiniment près toutes les prévisions fondées sur elle. Nous donnons au mot infiniment un sens quasi mathématique. Les sommes se laissent transformer en intégrales, et les variations, malgré la discontinuité foncière de l'hypothèse, y peuvent être considérées comme continues.

Si l'on se place à ce point de vue, la théorie cinétique des gaz parfaits est une admirable théorie mathématique, une des plus parfaites de la physique mathématique ; et, en même temps, elle est une admirable théorie physique, puisqu'elle serre de près les résultats de l'expérience. Mais il ne faut jamais perdre de vue que nous sommes en présence de lois des grands nombres, de formules statistiques, de moyennes, où, comme dans toute statistique, les contingences, les irrégularités individuelles disparaissent devant une compensation d'une régularité et d'une nécessité, aussi voisines que l'on veut de la régularité et de la nécessité parfaites, à mesure que croît le nombre des individus sur lesquels elles portent. L'hypothèse du chaos moléculaire réclame premièrement que les mouvements et les chocs moléculaires ne modifient pas la

densité moléculaire du gaz, c'est-à-dire le nombre des molécules par élément de volume du gaz. Deuxièmement, elle exige que « dans chaque élément de volume, les molécules possèdent des vitesses dont les directions sont réparties uniformément dans tous les sens, et dont les grandeurs sont elles-mêmes distribuées suivant une loi indépendante de la position de l'élément choisi (1) ».

Les fondateurs de la théorie, Daniel Bernouilli entre autres, demandaient que les molécules gazeuses fussent toutes et toujours animées de la même vitesse aux mêmes conditions de pression et de température. Cette vitesse était proportionnelle à la pression et à la température, croissant ou diminuant avec elles. Un tel postulat était un défi aux lois de la mécanique sur les échanges de quantité de mouvement dans le choc. Le grand progrès fait par Maxwell, c'est précisément d'avoir montré que, quelles que soient les vitesses initiales, même si elles étaient d'abord identiques, elles se modifient immédiatement par les changements de vitesse à chaque choc. Tout gaz en équilibre thermique et de densité uniforme, c'est-à-dire à une pression donnée, présente donc toute une gamme immense de vitesses moléculaires. Mais cette gamme reste invariable, pour une pression et une température déterminées. Autrement dit dans toute masse gazeuse en équilibre, où s'est réalisé toujours et presque instantanément l'état de chaos moléculaire, quelles que soient les conditions physiques initiales (par exemple le métrage de deux masses à température différente), les grandeurs des vitesses moléculaires se distribuent suivant une loi déterminée, indépendante de toute autre condition physique. C'est le théorème de distribution des vitesses de Maxwell, dont la démonstration ne laisse plus rien à désirer aujourd'hui après les travaux de Boltzmann

(1) Bloch, *La théorie cinétique des gaz*, p. 7.

et de Jeans. Elle est d'ailleurs infinie par l'ensemble de ses conséquences expérimentales. Le théorème a pour but d'établir l'expression du nombre des molécules qui dans chaque direction de l'espace, et à chaque instant, se meuvent avec une vitesse comprise entre deux limites données. Il doit donc permettre d'établir la vitesse moyenne des molécules, par suite leur force vive moyenne, et de lier celle-ci à la température et à la pression. Bref il établit l'intermédiaire nécessaire entre l'hypothèse du chaos moléculaire qui est une représentation discontinue de la structure des gaz, avec leurs propriétés réelles, telles que l'expérience nous les révèle, et qui présentent des variations continues.

La loi de distribution se représente par un graphique simple, une courbe en cloche. L'aire embrassée, entre un arc de cette courbe et les projections de cet arc sur l'abcisse, représente le nombre relatif des molécules dont les vitesses sont comprises entre les valeurs portées aux extrémités de la longueur découpée par la projection de l'arc sur l'abcisse. La formule de la loi évoque celle que Gauss a donnée par le calcul des erreurs fortuites dans la mesure d'une grandeur (auxquelles se réduisent les erreurs d'expérience ; méthode des moindres carrés, loi des grands nombres). La fonction que représente la courbe en cloche, fonction exponentielle, se prête en effet à traduire une loi de probabilités.

La première conséquence de la loi de distribution des vitesses, c'est de permettre d'établir la vitesse moyenne des molécules dans l'agitation désordonnée de ce chaos moléculaire qu'est un gaz parfait. Cette conséquence est capitale car, comme on a la somme des masses moléculaires, puisqu'on connaît la densité du gaz et son volume, son poids par unité de volume, on pourra immédiatement former les expressions mécaniques fondamentales : sa pression et son énergie moléculaire, en fonction de la masse et de

la vitesse des molécules. Ici encore on va atteindre des formules globales, des moyennes qui se trouveront vérifiées par des expériences globales, à notre échelle. Elles résultent d'une multitude d'éléments individuels que l'expérience ne peut atteindre. Mais les irrégularités finissent par se compenser absolument, à cause du grand nombre de ces éléments et du fait qu'ils n'ont jamais aucun privilège les uns par rapport aux autres. Ils sont interchangeables, et se comportent tous de toutes les manières possibles. Si bien qu'on peut leur appliquer ce qu'on appelle les lois du hasard, ou le calcul des chances, les théorèmes de probabilité, toutes expressions sur lesquelles nous aurons à revenir tout à l'heure.

On peut entendre, par vitesse moyenne, la moyenne de toutes les vitesses à un instant quelconque, ou, ce qui revient au même, la moyenne de toutes les vitesses que prend une molécule quelconque pendant un temps suffisamment long, puisque toutes les molécules sont interchangeables. Mais cette vitesse moyenne ne peut pas — telle quelle — servir à former le carré qui nous servira à déterminer la force vive moléculaire moyenne de la masse de gaz considérée : car la racine de la moyenne d'une somme de nombres élevés au carré n'est pas égale à la moyenne de la somme de ces nombres. Elle lui est toujours supérieure. Précisément le théorème de distribution de Maxwell — et c'est là ce qui permet de construire mathématiquement la théorie cinétique des gaz, et de prendre ce théorème comme point de départ,—le théorème, disons-nous, donne le moyen d'établir directement la vitesse dont le carré égale le carré moyen de la somme de toutes les vitesses présentées par l'ensemble des molécules de notre masse gazeuse à un instant donné : c'est la vitesse quadratique moyenne, ou vitesse efficace, dont on déduit facilement la vitesse moyenne dont nous avons parlé d'abord et qui en est à très peu près les douze treizièmes.

Il est alors très facile sans aucune hypothèse nouvelle, d'évaluer l'énergie moléculaire totale d'une masse donnée d'un gaz parfait. Nous connaissons sa masse qui est la somme des masses de ses molécules et leur vitesse quadratique moyenne. L'énergie moléculaire totale est le demi-produit de ces masses par le carré de cette vitesse. Un calcul simple donnera en fonction de cette énergie la pression du gaz sur les parois : elle sera égale aux deux tiers de l'énergie cinétique totale de translation des molécules de notre masse de gaz.

En appliquant la formule expérimentale qui relie les lois de Mariotte et de Gay-Lussac relatives aux gaz parfaits,

$$P\ V = R\ T$$

ce qui est dire « le produit de la pression par le volume est proportionnel à la température absolue du gaz », il en résulte immédiatement que la température absolue du gaz est proportionnelle à la force vive moléculaire moyenne. Pour préciser, ce produit R T sera égal au tiers restant de cette énergie totale de translation dont les deux autres tiers représentent, nous venons de le voir, la pression du gaz. Et s'éclaire aussitôt la formule empirique qui se trouvait relier la température au volume et à la pression. On sait que la température absolue d'un gaz (loi d'Amontons et de Gay-Lussac) peut s'évaluer par la dilatation à pression constante à partir d'un zéro base de l'échelle de température, où le volume du gaz, si ce zéro pouvait être atteint, serait nul. Le coefficient de dilatation des gaz sous pression constante est, expérimentalement, le même pour tous les gaz réels, pourvu que l'on soit à peu près en *parfait* état gazeux, assez loin du point de liquéfaction du gaz, c'est-à-dire encore, aussi près que possible des conditions du chaos moléculaire désigné sous le nom de gaz parfait. De là, il résulte que le nombre des molécules dans tous les gaz peut être considéré pratiquement comme identique pour un

même volume, une même température et une même pression (Loi d'Avrogado et d'Ampère).

VI

Les gaz parfaits.

Le théorème de distribution nous fait encore retrouver les lois expérimentales relatives au mélange des gaz.

La simplification préliminaire supposait le gaz en expérience formé de molécules identiques et nous avions fait remarquer que cette supposition ne signifiait rien autre que cette hypothèse rationnelle, à savoir que des inégalités non systématiques devaient être compensées par suite du nombre prodigieux des éléments dont l'expérience ne connaissait que le comportement moyen.

En réalité cela va plus loin encore. Si nous mélangeons des gaz différents, l'expérience nous apprend que ce mélange se comporte comme si la masse de chacun des gaz du mélange occupait à elle seule le volume total. « Le gaz est du vide pour un autre gaz » (Gibbs). A tous les gaz du mélange donc, s'applique la loi de distribution de Maxwell de la même façon. Les différences dans leurs molécules laissent intactes les lois *statistiques* qui s'appliquent à leur comportement moyen. Si même la densité est très différente, comme l'hydrogène mêlé à l'acide carbonique dont les densités sont comme 1 à 22, au bout d'un certain temps le mélange des deux gaz s'est effectué complètement. Cela est encore vrai si l'on a adopté un dispositif où, à l'état initial, le gaz le plus léger est en haut, les deux gaz étant dans les mêmes conditions de température et de pression.

Les gaz quelle que soit leur densité se comportent donc comme s'ils étaient constitués par le même nombre d'éléments moléculaires. Ce nombre qui est une constante universelle est le nombre ou la cons-

tante d'Avrogado-Ampère dont nous venons de parler.

Les mesures expérimentales extrêmes de ce nombre sont $60 \cdot 10^{22}$ et $75 \cdot 10^{22}$. Nous y reviendrons. Elles sont du même ordre décimal, mais comportent, comme on voit, étant donné l'énormité de l'élévation à la puissance, un écart considérable. Les recherches tendent à serrer le nombre autour de $60{,}6 \cdot 10^{22}$. Il nous semble d'ailleurs, toujours en nous plaçant au point de vue des lois des grands nombres, bases de la théorie cinétique, que nous puissions et devions nous accommoder d'un flottement que l'expérience tend en outre à réduire de plus en plus.

Ainsi en première approximation, la cinétique des gaz parfaits s'applique remarquablement. Elle s'établit uniquement sur ces deux postulats :

1° Tout se passe pour les gaz suffisamment éloignés de leur point de liquéfaction, comme s'ils étaient des machines obéissant parfaitement aux lois de la mécanique des corps élastiques : des machines constituées identiquement par des éléments analogues, en même nombre, semblablement disposés les uns par rapport aux autres, quand on les considère globalement, et quelle que soit la substance chimique dont ils sont faits.

2° L'étude des propriétés des gaz ainsi conçues ne peut être, en effet, à cause du nombre énorme des éléments mécaniques considérés, et de l'éloignement où nous sommes des conditions expérimentales d'une recherche qui porterait sur l'individualité de ces éléments, qu'une étude de résultantes moyennes. Nous ne pouvons atteindre que des lois de grand nombre et des probabilités.

En somme, une *mécanique statistique* qui repose rigoureusement sur les principes de la mécanique rationnelle et sur les lois du choc élastique d'une part, sur le calcul des probabilités d'autre part, voilà en quoi consiste la théorie cinétique des gaz, et voilà ce qui nous permet d'atteindre, avec une approximation

sans cesse grandissante, les lois expérimentales. A son aide, nous pouvons exprimer les grandes lois déjà connues. A son aide nous avons pu en prévoir d'autres, comme ce fait surprenant, au premier abord, que la viscosité ne dépend pas de la pression, interpréter des faits qui auparavant étaient inexplicables et ne semblaient aucunement se rattacher à la constitution des gaz : tels le bleu du ciel, l'opalescence critique, la largeur des raies spectrales, etc., tant d'autres faits qui ont trouvé là une interprétation remarquable par l'exactitude des accords du calcul et de l'expérience.

VII

Les gaz parfaits et les différences de structure moléculaire.

Nous avons considéré jusqu'ici la forme la plus simple de la théorie cinétique des gaz, forme déjà fort objective, malgré ce qu'on en a dit. La molécule gazeuse est une entité identique à elle-même, à sa masse près. Mais elle se comporte identiquement dans tous les gaz. Et nous venons de voir que, malgré la différence des masses, le mélange des gaz de densité moléculaire inégale se fait comme si les molécules étaient interchangeables, au point de vue de la théorie cinétique. Sans variation de température, ni de pression, sans une intervention des forces extérieures, le centre de gravité d'un tel mélange est susceptible de *remonter*, si les gaz sont de densité inégale, le plus léger occupant, à l'instant initial, la partie supérieure du système.

Mais on conçoit aisément que cette première enveloppe de la théorie cinétique, si éloignée de la réalité,ne puisse suffire à rendre compte de tous les phénomènes de l'état gazeux. Elle ne porte que sur les résultantes les plus superficielles, si l'on peut dire : elle n'exprime que des moyennes-enveloppes.

Il nous faut maintenant considérer les molécules du gaz. Et dans une seconde enveloppe, en quelque sorte intérieure à la première, nous prendrons en considération sa composition moléculaire. Celle-ci intervient dès qu'on a égard aux chaleurs moléculaires spécifiques et par suite à la distribution intramoléculaire de l'énergie.

La chaleur spécifique moléculaire d'un gaz est l'accroissement de la quantité de chaleur totale, ou énergie interne totale,qui est contenue dans une molécule-gramme du gaz, soit sous volume constant, soit à pression constante, pour une élévation de température de 1 degré.

Cette chaleur spécifique moléculaire est différente selon que nous opérons sous volume constant ou à pression constante, puisqu'il faut fournir de l'énergie pour ramener le gaz dont on augmente la température de 1 degré à volume constant, à la pression initiale, en augmentant à son tour le volume. D'après la formule des gaz parfaits,

$$PV = RT$$

cette énergie dépensée que nous retrouvons dans la chaleur spécifique moléculaire à pression constante, en plus de la chaleur spécifique sous volume constant est précisément égale à R, la constante des gaz parfaits.

D'après la théorie cinétique, la valeur de la chaleur spécifique moléculaire sous volume constant est égale à $\frac{3R}{2}$. La valeur de la chaleur spécifique moléculaire sous pression constante sera donc égale à $\frac{5R}{2}$. Ces deux chaleurs moléculaires spécifiques doivent être des constantes indépendantes de la température et de la nature des gaz, et leur rapport conserver une valeur invariable $= \frac{5}{3} = 1{,}666$. C'est ce que l'expé-

rience confirme de la façon la plus remarquable, pour les gaz monoatomiques.

Argon	1,667
Hélium	1,652
Krypton	1,666
Mercure (à l'état gazeux)	1,667

Il n'en est plus de même quand il s'agit des gaz polyatomiques.

L'expérience nous donne pour les gaz diatomiques

Hydrogène	(H^2)	1,407	voisins de 1,400
Azote	(N^2)	1,400	
Oxygène	(O^2)	1,399	
Oxyde de carbone	(CO)	1,398	
Bioxyde d'azote	(NO)	1,400	

pour les gaz triatomiques

Vapeur d'eau	(H^2O)	1,32	voisins de 1,333
Protoxyde d'azote	(N^2O)	1,304	
Acide carbonique	(CO^2)	1,300	
Ammoniaque	(NH^3)	1,336	
Méthane	(CH^4)	1,313	

pour les gaz tétriatomiques (1)

Ethylène	(C^2H^4)	1,25.

Nous ne pouvons donc plus, même à un point de vue très approximatif, raisonner sur les molécules polyatomiques comme si elles étaient des sphères homogènes élastiques. Les compensations ne masquent plus cette énorme simplification de l'hypothèse. Nous pouvons bien continuer à négliger les actions intermoléculaires, considérer que les chocs sont toujours élastiques. Mais nous ne pouvons plus, dans notre schéma, supposer que la chaleur communiquée à un gaz sous volume constant servira uniquement à accroître l'énergie cinétique de translation des molécules. Il faut supposer que la complexité de la molécule en absorbera une partie dans des mouvements de rotation propres à la molécule et aux atomes qui

(1) Nous empruntons ces nombres à Eug. Bloch, *Théorie cinétique des gaz*, p. 161.

la composent, à côté de ses mouvements de translation par rapport aux autres molécules.

L'expérience montre alors que les chaleurs moléculaires ne sont plus absolument indépendantes des températures. Elles n'en dépendent que fort peu, il est vrai, et même dans un long intervalle de températures, là où nous atteignons l'état quasi parfait, le rapport de nos deux chaleurs moléculaires reste à peu près constant. Seulement il n'est plus *le même* que pour les gaz monoatomiques. Il est plus petit, puisqu'une partie de l'énergie communiquée par les chocs ne se change pas en énergie de translation, mais s'accumule en mouvements de rotation propres à la molécule : globalement sous la forme d'une énergie potentielle moyenne, fonction de la température. Les expériences dont nous venons de rapporter les résultats montrent que pour les gaz diatomiques, ce rapport de $\frac{5}{3}$ tombe à $\frac{7}{5}$, pour les gaz triatomiques à $\frac{4}{3}$, pour les gaz plus complexes à $\frac{5}{4}$.

Autrement dit, pour les gaz diatomiques l'énergie intramoléculaire vaut les $\frac{2}{3}$ de l'énergie de translation. Dans les gaz triatomiques, elle peut atteindre la valeur de cette dernière et dans les gaz plus complexes la dépasser. Mais le rapport entre ces deux énergies reste toujours *simple*. Et c'est là le fait très remarquable que la théorie cinétique des gaz doit prendre en considération.

VIII

L'équipartition de l'énergie.

L'interprétation de ce fait a conduit Maxwell et Boltzmann au principe *de l'équipartition de l'énergie*.

Il est très difficile de donner de ce principe une

interprétation qui ne soit pas d'ordre exclusivement mathématique sans en fausser la signification. Et cependant notre effort doit viser à chercher, si elles en ont une, la signification réelle, de formules qui se présentent plus simplement comme un algorithme. Si elles n'en avaient point, nous devrions nous borner à le signaler, sans plus. Mais le principe de l'équipartition de l'énergie, pour abstrait qu'il soit, se rattache à la réalité, par voie hypothético-déductive, comme tout véritable principe de la physique, et nous devons dès lors chercher à mettre ce lien sous forme intuitive, ce qui revient à déterminer le sens réaliste (mais hypothétique) du principe. L'hypothèse devient une conjecture sur la structure et les lois du réel.

Revenons à ce qui a servi de point de départ technique à toute l'actuelle forme de la théorie cinétique : à savoir le théorème de distribution de Maxwell, et l'hypothèse du chaos moléculaire.

La loi générale de distribution des vitesses va nous amener à une *loi générale de la distribution de l'énergie.*

Dans le chaos moléculaire, essayons de suivre isolément une des molécules. Nous pourrons décrire mathématiquement toute son histoire en rapportant les modifications diverses qui constituent cette histoire à un certain nombre de repères, de paramètres. Ainsi assigne-t-on l'histoire du trajet d'un train par rapport aux repères horaires que nous donne une horloge : paramètre des temps, et aux repères locaux que nous donnent les bornes kilométriques : paramètre des distances.

Il convient évidemment de réduire au plus petit nombre possible ces paramètres : à ceux qui sont suffisants et nécessaires pour que la description ne laisse place à aucune équivoque, c'est-à-dire aux paramètres qui sont *indépendants* les uns des autres.

Tous les événements qui concernent la trajectoire d'une molécule, son mouvement de *translation*, pourront être assignés en les rapportant au trièdre de

référence de la géométrie analytique, c'est-à-dire aux coordonnées de la position de la molécule, à chaque instant selon les trois dimensions de l'espace. Et ces trois paramètres nécessaires sont suffisants. Si nous envisageons maintenant la structure interne de la molécule, par exemple la molécule d'un gaz diatomique, une molécule à deux atomes, les chocs modifient les rotations de ce système, du moins certaines d'entre elles. Il faut introduire, en plus des trois paramètres relatifs au mouvement de translation, deux nouveaux paramètres indépendants pour décrire l'histoire des rotations du système, et ainsi de suite à mesure que ce système se compliquera.

Appliquons à ce système les théorèmes de la mécanique classique pour calculer son énergie. Cette énergie est une fonction des paramètres indépendants qui servent à décrire son histoire. Elle se décompose en une somme de deux termes : l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Cette dernière dépend uniquement de la structure de la molécule et de ses rapports avec les champs de force dans lesquels elle est placée.

L'énergie cinétique est l'énergie que possède la molécule, en vertu de son mouvement. Elle dépend des *vitesses*. Celles-ci s'expriment mathématiquement par des fonctions des trois coordonnées spéciales dont nous avons parlé tout à l'heure (1).

C'est par rapport à ces fonctions des coordonnées dites « coordonnées de vitesse » que se formulera la valeur de l'énergie cinétique.

Si on revient maintenant à l'hypothèse du chaos moléculaire et au théorème de distribution de Maxwell et Boltzmann, le calcul, étant donné le nombre total des molécules d'une part, leur énergie totale de l'autre, nous fait aboutir à cette conclusion très générale

(1) Les dérivées de ces trois coordonnées par rapport au temps.

que l'énergie cinétique moyenne par rapport à l'une quelconque des coordonnées de vitesse possède une valeur *invariable identique* pour chacune de ces coordonnées et pour toutes les molécules $\frac{1}{4h}$. h est une constante inversement proportionnelle à la température absolue. Autrement dit il y a *équipartition de l'énergie*, répartition *égale* de l'énergie, entre les composantes de vitesse de chaque molécule selon les coordonnées choisies, selon les paramètres ou les degrés de liberté dont la considération est nécessaire et suffisante pour déterminer les mouvements de la molécule.

Puisque la chaleur est la forme sous laquelle l'énergie est fournie aux molécules et puisque cette chaleur tout entière ne sert qu'à accroître la vitesse de ces molécules, l'élévation de la température n'étant rien autre que cet accroissement, calculons d'après ces données les coefficients de chaleur spécifique sous volume constant, puis à pression constante, calculons leurs rapports et comparons avec les résultats expérimentaux que nous avons donnés tout à l'heure.

Dans le cas d'une molécule monoatomique nous n'avons à considérer que les trois composantes de l'énergie de translation pour décrire le mouvement de la molécule. La chaleur communiquée à un gaz ne sert qu'à accroître son énergie cinétique de translation, c'est-à-dire la vitesse de la molécule, qui s'évalue uniquement par son déplacement par rapport aux trois directions de l'espace. Dans ce cas alors la chaleur spécifique sous volume constant est, en désignant toujours par R la constante des gaz parfaits $\frac{3\,R}{2} = 2{,}97$ et son rapport avec la chaleur spécifique sous pression constante qui est voisine de 5 est d'après le calcul de $\frac{5}{3}$ (1,666) ; ce qui, nous l'avons vu, est bien le nom-

bre autour duquel oscillent de très près toutes les mesures expérimentales.

Avec les gaz diatomiques l'énergie se répartit autrement, puisqu'elle est absorbée en partie par les mouvements de rotation. Cette rotation est un déplacement par rapport à deux paramètres nouveaux qu'il faut ajouter et qu'il suffit d'ajouter aux trois paramètres du mouvement de translation.

D'après le principe d'équipartition de l'énergie, s'il est recevable, la répartition moyenne de l'énergie entre ces degrés de liberté doit se faire de façon à ce que sa valeur soit identique pour chacun d'entre eux. Le coefficient de la chaleur spécifique sous volume constant sera donc ici de $\frac{5R}{2}$ au lieu de $\frac{3R}{2} = 4{,}95$, ce qui est bien le nombre moyen trouvé expérimentalement. Le rapport avec la chaleur spécifique sous pression constante doit être voisin de 1,40, ce qui est aussi vérifié, puisque le coefficient de chaleur spécifique sous pression constante est voisin de 7.

Nous trouverions de même pour les gaz triatomiques $\frac{7R}{2}$, et pour le rapport des deux chaleurs spécifiques 1,33,ce qui est aussi bien vérifié par l'expérience. Enfin pour les gaz à molécules plus complexes la valeur de ce rapport atteint 1,25, ou, à la limite 1, ce qui correspond à une augmentation croissante de l'énergie moléculaire par rapport à l'énergie gobale de translation. Elle peut atteindre la valeur de cette dernière et même la dépasser.

Mais toujours, et c'est là ce qui nous importe, le calcul fait en vertu du principe d'équipartition de l'énergie nous fait conclure à un *rapport rationnel simple* dans la répartition de cette énergie selon les différents paramètres, nécessaires et suffisants pour définir le mouvement de la molécule : de telle façon que les deux coefficients de chaleur spécifique sous volume constant et sous pression constante soient

eux-mêmes des rapports constants, pour chaque type moléculaire. *Et l'expérience vérifie remarquablement les résultats du calcul.*

Au degré d'approximation où nous sommes, puisqu'il s'agit toujours du comportement général et moyen des molécules, puisque toujours aussi nous restons assez loin de l'individu moléculaire, le principe d'équipartition de l'énergie est donc recevable. Il nous sert dans nos moyennes, dans nos probabilités, à serrer d'un peu plus près cependant les molécules individuelles, puisqu'il nous force à tenir compte de leur structure atomique interne.

La théorie cinétique des gaz, peut-on dire, détaille de plus en plus sa statistique et s'avance au-devant des réalités individuelles. Dans cette deuxième enveloppe trouvée au dedans de la première, qui n'envisageait en bloc que les mouvements, les vitesses des molécules, toutes considérées comme identiques, plus exactement toutes considérées comme annulant leurs particularités individuelles par compensations réciproques, grâce à la loi des grands nombres, la théorie parvient à tenir compte de certaines asymétries encore très générales dont l'effet se fait sentir dans les calculs de moyennes.

Ainsi à l'intérieur d'une statistique des suicides où l'on ne tient compte que de la masse humaine, peut-on donner une statistique plus serrée, où l'on tiendra compte, par exemple, de l'âge, du sexe ou des professions.

IX

Les gaz réels.

Et maintenant à l'intérieur encore de cette seconde enveloppe, nous allons atteindre des moyennes plus serrées encore. Nous allons tenir compte des particularités qui séparent en bloc les gaz réels des gaz parfaits. L'expérience depuis longtemps avait révélé

des écarts systématiques avec les lois générales des gaz, lorsque la température de ceux-ci s'abaissait près du point de liquéfaction, ou lorsque la pression devenait très forte, ce qui d'ailleurs rapproche également un gaz de son point de liquéfaction. Les gaz quasi parfaits, au fond, ne sont que des vapeurs, qui sous les conditions ordinaires de température et de pression se trouvent suffisamment éloignés de leurs points de liquéfaction, comme l'air, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, etc.

Ecarts *systématiques*, donc, qui indiquent non des oscillations fortuites ou des effets secondaires, lesquels tantôt se neutralisent, et tantôt s'additionnent, mais l'effet de conditions permanentes : une modification indispensable des lois, des formules, des théories.

Or, la théorie cinétique nous offre une interprétation presque immédiate de ces écarts ; il ne s'agit que d'en déterminer l'allure dans une formule de calcul. Ce fut l'œuvre de Van der Waals. La formule avec ces corrections est empirique. Et cela se conçoit puisque les éléments expérimentaux qui devraient conduire notre raisonnement, à savoir la forme des molécules, leur volume exact, les forces qui s'exercent entre elles à mesure qu'elles viennent en contact, la signification même de ce mot contact quand il s'agit des molécules et par suite l'allure exacte du choc, tout cela nous est encore inconnu. Cependant tout cela doit influer, si l'on songe aux prémisses de la théorie cinétique, sur les lois qui régissent les variations concomitantes de la pression, du volume et de la température. Cette influence est d'autant plus grande que les molécules qui constituent la masse gazeuse sont plus voisines, c'est-à-dire à mesure qu'on se rapproche du changement de l'état gazeux à l'état liquide, soit que la pression augmente, soit que la température s'abaisse.

L'expérience ici, comme ailleurs, ne nous renseigne

que d'une manière globale. Elle est à notre échelle ; partant elle est grossièrement synthétique. Elle permet toutefois de tracer des courbes des valeurs par lesquelles passent les variables de pression et de température, courbes qui représentent le comportement des gaz, leurs manières d'être successives, particulières pour chacun d'eux, puisque le point de liquéfaction change pour chacun d'eux, mais cependant analogues dans leur allure, si on les compare toutes à partir de ce point. Si bien qu'on peut et qu'on doit essayer par une formule unique d'embrasser cette allure.

Pour arriver à cette formule, on a été guidé par certains raisonnements qui procèdent de prémisses hypothétiques, comme dans toutes les sciences inductives. C'est à la vérification expérimentale des conclusions — de certaines conclusions — par un choc en retour de confirmer ces prémisses.

Ici les prémisses c'est la théorie cinétique des gaz. Malgré les complications introduites dans notre seconde enveloppe théorique, nous avons encore raisonné d'une façon beaucoup trop abstraite et simpliste. Nous avons réduit les molécules et leurs atomes à leur centre de gravité, car partout il s'est agi, dans la distribution des vitesses, comme dans la distribution de l'énergie (équipartition), de rapporter à des paramètres de coordonnées, non point la molécule (ou ses atomes), avec ses dimensions réelles, mais le point mathématique figuratif du centre de gravité de ces molécules.

Or, la molécule n'est pas un point mathématique. Elle a un volume, si petit qu'il soit par rapport à l'espace vide que parcourt la molécule. Elle est elle-même un édifice, très complexe. Bien plus d'après nos idées actuelles sur la matière, sur l'atome, ce n'est pas seulement la forme réelle et matérielle de celui-ci (si elle existe) qui importe, c'est ce qu'on a appelé sa sphère de protection, la région d'espace, qu'il

rend impénétrable dans les conditions ordinaires à une force donnée, ici, aux forces que développent les autres corpuscules similaires dans leur course.

Cette sphère de protection à la périphérie de laquelle s'effectue le choc (au moment où les deux sphères de protection de chacune des molécules qui s'entrechoquent sont tangentes), et qui est, extraordinairement, plus grande que les volumes réels des atomes constitutifs de la molécule, délimite la portion d'espace que des pressions à notre échelle ne peuvent jamais restreindre davantage, le volume incompressible,de la région moléculaire. Il en résulte que lorsque nous augmentons la pression, ce volume tient de plus en plus de place, par rapport à l'espace libre dans lequel se meuvent les molécules.

Or, l'image que nous avons admise jusqu'ici néglige le volume d'incompressibilité moléculaire, le volume de la sphère de protection des molécules en face de l'espace libre incomparablement plus grand dans lequel elles se meuvent.

Les conséquences en sont exactes pour des pressions relativement faibles ou des températures relativement hautes en comparaison de celles où le gaz tend à passer à l'état liquide. Mais dès qu'on se rapproche du point de liquéfaction, il n'en peut plus être de même. L'espace libre devient de plus en plus petit par rapport aux volumes particulaires incompressibles.

Les choses sont encore plus complexes d'ailleurs. Les molécules, pour les mêmes raisons, ne touchent pas la paroi de l'enceinte par leurs *centres*, comme le supposait la loi de Mariotte, mais par la périphérie de leur sphère de protection. Il y a encore là une correction de même sens qui vient s'ajouter à la première.

Le résultat c'est que le volume total ne peut plus se réduire d'une façon strictement parallèle à l'augmentation des pressions. Il reste toujours plus grand,

puisque sa partie incompressible, irréductible, grandit sans cesse aux dépens de l'espace libre. Jusqu'à ce que tout l'espace libre étant supprimé au bénéfice des sphères moléculaires incompressibles qui l'occupent tout entier, ainsi que des boulets empilés côte à côte, nous n'ayons plus affaire à un gaz mais à un liquide.

X

L'équation de Van der Waals.

En tenant compte des volumes moléculaires incompressibles selon leur rapport au volume total occupé par la masse gazeuse en expérience, nous devons trouver une formule qui reproduise l'allure du phénomène de façon moins inexacte que la simple équation des gaz parfaits $P V = R T$. Et c'est ce que Van der Waals a introduit avec bonheur avec son terme correcteur qui représente le *covolume* (nom donné au volume propre des molécules et de leurs sphères de protection), en s'appuyant sur de nombreuses données expérimentales (1).

Cette correction n'est point la seule qui doive être faite. Au voisinage des molécules il est nécessaire que se développent des forces de cohésion particulières dont l'effet est manifeste d'abord dans la viscosité des gaz, ensuite et surtout dans le changement de l'état gazeux en état liquide. A ce moment ces forces de cohésion ont vaincu la force d'expansion des gaz et enchaîné la liberté de mouvement des molécules. Dans l'intérieur de la masse en expérience ces actions cohésives s'annulent par raison de symétrie, mais il n'en est pas de même contre la paroi. Ici des

(1) « Tout se passe comme si le volume total du gaz était simplement diminué de la quantité b, représentant le volume propre des molécules » : $P (V\text{-}b) = RT$. b s'appelle la constante de covolume. En réalité les corrections ultérieures de la théorie n'en feront plus une constante.

forces attractives non compensées doivent se manifester vers l'intérieur, puisque du côté de la paroi il n'y a plus de molécules, donc point de forces attractives vers l'extérieur. Ces forces tendent nécessairement à augmenter l'action de la paroi elle-même, donc à augmenter la pression : elles constituent *la pression interne*. Elle est, comme on voit, proportionnelle à la densité des molécules dans l'enceinte, à leur nombre par rapport à l'unité de volume. La pression tend donc à s'accroître en fonction du volume, plus vite que ne le feraient prévoir les termes de l'équation générale des gaz parfaits, à mesure que ce volume diminue lui-même. D'où un nouveau terme de correction qui s'ajoute au précédent et nous donne l'équation de Van der Waals (1).

Les termes sont déterminés *a priori*, évidemment, mais en vertu d'hypothèses logiques. Ces hypothèses logiques sont bien les substituts d'actions réelles manifestes. Comme nos possibilités expérimentales ne nous permettent pas de suivre ces actions réelles dans leur individualité, nous sommes toujours sur le terrain des lois de grand nombre et des résultantes, avec toute la théorie cinétique des gaz. Malgré tout, en première approximation et pour des pressions assez faibles, l'équation représente assez bien les irrégularités par rapport aux lois simplistes de Mariotte et de Gay-Lussac. Si les résultats quantitatifs sont encore insuffisants en dehors de limites assez restreintes, les courbes obtenues à l'aide de l'équation tracent de façon remarquable l'allure qualitative générale des phénomènes (2).

(1) $\frac{a}{V^2}$, qui donne alors pour l'équation générale

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT :$$

c'est l'équation de Van der Waals.

(2) Par exemple pour les isothermes des gaz.

En particulier l'équation nous permet d'assigner très exactement pour celui des gaz réels dont les irrégularités ont les premières attiré l'attention, le gaz carbonique, les courbes isothermes trouvées expérimentalement par Andrews, même lorsque le gaz est très fortement comprimé. Elle nous fournit enfin une image satisfaisante des états critiques, et des retards de vaporisation et de condensation, au voisinage de ces états, ainsi que la loi des états correspondants dont nous parlerons bientôt.

Nos nouvelles et toutes dernières conceptions de l'électricité, de la matière et de l'atome ont confirmé, par une approche bien plus poussée encore, les résultats de Van der Waals.

L'équation de Van der Waals a été d'ailleurs complétée par des termes d'ordre supérieur à celui qu'il retient. C'est toujours l'approximation qui se poursuit, vers l'individuel et vers le réel, mais toujours encore et nécessairement sur le terrain des moyennes et des résultantes. Les formules nouvelles et plus complètes de Dieterici, Lorentz, Jeans, Reinganum, ont avec l'expérience des concordances bien meilleures sans être parfaites (1).

Il ne faut pas oublier, en effet, que c'est par des raisonnements plausibles en l'absence de renseignements directs sur la forme des molécules et des atomes que nous atteignons tous ces résultats. Il n'y a d'ailleurs pas là une dérogation à la méthode expérimentale telle qu'elle est employée dans la physique, à la méthode expérimentale réelle. Celle-ci consiste toujours à construire par le raisonnement une hypothèse, une induction fondée sur une compréhension logique de faits bruts de l'expérience (ici les lois de Mariotte et de Gay-Lussac), et à déduire de cette hypothèse par le calcul certaines conséquences qui se

(1) $P(V - b) = RTe^{-\frac{a}{RTV}}$

prêtent à la vérification, à la corroboration expérimentales. Il y a d'ailleurs choc en retour, action et réaction continues, entre la construction et les confrontations avec l'expérience,amendements incessants des données logiques plausibles par le contact avec l'expérience. C'est ainsi que procède depuis ses prémisses la théorie cinétique des gaz. On ne connaît ni l'atome ni la molécule, ni les forces dont ils sont les sièges. Mais on a construit une représentation atomistique et moléculaire simple, la plus simple possible d'abord. En la développant grâce au calcul des probabilités on a vu qu'elle rejoint *grosso modo* l'expérience. On a corrigé,en la compliquant à mesure, la première hypothèse, enveloppe trop large et trop flottante, de façon à ce qu'elle se transforme en enveloppes successives qui s'ajustent de mieux en mieux aux résultats de l'expérience et en épouse de plus en plus près le contour. L'enveloppe à laquelle on est enfin parvenu est bien encore lâche. On est si loin de la réalité infinitésimale qu'il faudrait saisir pour être exact !

Mais, somme toute, cela recouvre la plus grande partie des phénomènes relatifs à l'état gazeux d'un vêtement convenablement mesuré sur l'expérience.

CHAPITRE II

LE CINÉTISME A LA POURSUITE DU RÉEL

I

La viscosité des gaz.

De l'ajustement au réel de la théorie cinétique des gaz témoigne la confrontation des conséquences mathématiques se déduisant de cette théorie, avec l'expérience. Il y a là autant de confirmations expérimentales de la théorie qui nous permettent de serrer de plus en plus la constitution des gaz réels, en partant de l'image idéale des gaz parfaits. C'est une logique construite à partir de prémisses rationnelles, d'abord posées *a priori*. Elle rejoint de proche en proche la réalité physique, en tenant compte à mesure des complexités qui, logiquement, raisonnablement, doivent s'ajouter à l'extrême simplisme du point de départ, et se plaquer sur lui.

Jusqu'ici par exemple, les gaz ont été considérés comme des milieux absolument fluides, c'est-à-dire transparents, perméables à tout corps introduit dans le volume qu'ils occupent. Ce corps ne rencontrerait aucune résistance, pour une raison de symétrie, toutes les actions moléculaires se compensant exactement à cause du nombre immense de ces actions. Les gaz seraient sans frottement intérieur, sans *viscosité*.

Or, les gaz réels ont tous une certaine viscosité. Plongeons dans une enceinte occupée par un gaz deux lames planes parallèles, de grande surface, et très rapprochées l'une de l'autre. Si nous déplaçons l'une de ces lames, dans son propre plan nous voyons que l'autre suit le mouvement de la première dans une direction parallèle. Tout se passe comme si les deux lames étaient plongées dans un liquide visqueux, et où l'entraînement est dans une certaine mesure d'autant plus sensible que le liquide est plus visqueux. Nous avons donc affaire dans tous les fluides à un frottement intérieur transmis par ces fluides, et qui témoigne que dans une certaine mesure le fluide adhère aux corps qui y sont plongés.

Des couches de fluide découpées idéalement dans la masse totale doivent nécessairement y présenter la même adhésion mutuelle. C'est cette adhésion interne les unes aux autres des parties d'un fluide relativement grandes par rapport à ses éléments moléculaires, qui constitue la viscosité ou le frottement interne de ce fluide. L'expérience permet de déterminer pour les liquides et les gaz ce coefficient de viscosité. Le calcul le permet également pour les liquides en partant des équations de l'hydrodynamique pour les fluides parfaits et en les corrigeant par des termes de viscosité.

Il en est de même pour les gaz en partant de la théorie cinétique, et Maxwell a donné une interprétation remarquable de la viscosité en la fondant sur les postulats de la théorie. Le calcul est compliqué. En gros, voici le principe de l'interprétation : une fois atteint le régime permanent nouveau entraîné par la perturbation qu'un mouvement uniforme de la large lame introduit dans la masse gazeuse, primitivement en équilibre statistique, les diverses couches gazeuses que nous pouvons découper parallèlement aux lames n'ont plus de vitesse moyenne identique. La vitesse de la lame augmente celle des couches qui

se trouvent derrière elle (donc entre les deux lames) et d'une façon proportionnelle à leur distance de la lame (comme le vérifie l'expérience). La seconde plaque est donc entraînée dans le sens du mouvement de la première, proportionnellement à la quantité supérieure de mouvement que possèdent, en moyenne, les molécules situées derrière la première plaque. Cette différence des quantités de mouvement transportées par les molécules en deçà et au delà de la lame mobile explique la force de frottement intérieur et mesure le coefficient de viscosité. Le bombardement de chaque couche sur la couche voisine tend à égaliser les vitesses d'où, en régime permanent, l'entraînement de la lame non mue par celle qui l'est.

II

Densité et viscosité.

Les calculs qui aboutissent à la détermination par la théorie cinétique des gaz du coefficient de viscosité ont dû faire entrer en jeu certaines grandeurs dont dépend ce coefficient d'après la théorie elle-même. Il y a d'abord le *libre parcours moyen* d'une molécule. On appelle ainsi le chemin que parcourt en moyenne une molécule avant d'en rencontrer une autre, autrement dit la distance moyenne parcourue entre deux chocs successifs, par une même molécule. Il y a ensuite la densité absolue du gaz (le nombre moyen de molécules par unité de volume) et la température, c'est-à-dire la vitesse moyenne des molécules. Le coefficient de viscosité a été trouvé égal à peu près au tiers (avec un calcul plus précis : 0,3503) du produit de ces trois quantités.

Le parcours moyen est inversement proportionnel à la densité du gaz à température constante ; il est donc inversement proportionnel à la pression : moins est grand le volume occupé par un même nombre de molécules et plus sont fréquentes les rencontres

entre elles, donc moindres les distances parcourues entre deux de ces rencontres : ceci est presque intuitif.

Mais alors le coefficient de viscosité du gaz doit être à peu près indépendant de la pression, puisque si la température est constante il est le produit de deux grandeurs qui varient en sens inverse l'une de l'autre en laissant ce produit constant.

Ce résultat était surprenant car il semble que, quelque autre image qu'on se fît d'un gaz, la viscosité dût être proportionnelle elle aussi à la densité. Et c'est bien ce qui devrait arriver si l'on avait affaire à un fluide continu. Mais précisément la théorie cinétique des gaz permet de comprendre immédiatement cette anomalie paradoxale.

Ce fut son premier grand succès. Elle oblige à prévoir quelque chose qui va contre toutes les apparences et contre les conclusions d'un raisonnement au premier abord logique. A partir des prémisses de la théorie cinétique, on doit évidemment conclure que si avec une pression doublée le bombardement de chaque couche parallèle sur la couche voisine est bien doublé, en revanche ces molécules, — à cause du nombre des chocs qui est aussi doublé, ou, ce qui revient au même, de leur libre parcours qui est diminué de moitié, — ne pénètrent dans l'autre couche qu'à une profondeur moitié moindre. Compensation réelle conforme à la compensation qui résulte de la formule mathématique.

L'expérience, dès 1866, vérifia cette conclusion pour tous les gaz aux pressions moyennes. Aux très fortes pressions, nous retrouvons les écarts que nous avons rencontrés, chaque fois, entre les mesures expérimentales et soit les lois empiriques établies d'après les pressions moyennes, soit les conclusions tirées de la théorie cinétique. Il est logique qu'alors le rapprochement des molécules, et les forces intermoléculaires qui en naissent, introduisent des effets nouveaux qui se superposent à ceux de l'état d'un

gaz beaucoup plus proche de cet état idéal qu'on a appelé *parfait*.

III

Quelques précisions numériques.

Ces calculs nous amènent à déterminer des grandeurs intéressantes relatives à la structure des gaz, en théorie cinétique.

A la température de 0° et à la pression normale, les libres parcours sont pour les molécules d'hydrogène de 0 centimètre 0000158, pour celles d'oxygène 0,0000090, pour celles du gaz carbonique 0,0000055, soit de l'ordre du dixième de *micron*. En une seconde le nombre des chocs que subit *une* molécule d'hydrogène est de 10 milliards 700 millions ; il est pour une molécule d'oxygène de 6 milliards 620 millions et pour une molécule de gaz carbonique de 4 milliards 770 millions.

Les vitesses moyennes des molécules (1), en partant des postulats de la théorie cinétique, sont de 1.695 mètres par seconde pour l'hydrogène,de 425 mètres pour l'oxygène et de 362 mètres pour le gaz carbonique, aux conditions normales de température et de pression ; de l'ordre de la vitesse d'une balle de fusil.

Les formules permettent de calculer une relation entre les coefficients de viscosité, ceux de conductibilité thermique, et la chaleur spécifique sous volume constant pour chaque gaz, à une température et une pression données. Là encore l'expérience a remarquablement vérifié les valeurs calculées en tenant compte de la structure monoatomique, diatomique ou polyatomique des gaz. Avec les gaz dont l'atomicité est

(1) Qu'il ne faut pas confondre avec la vitesse quadratique moyenne,supérieure d'environ 1/13e à celle-ci, ni avec la vitesse la plus probable qui lui est au contraire inférieure.

supérieure à 2, l'expérience s'avère d'ailleurs plus flottante, quand on la rapporte aux résultats du calcul. Mais nous savons que le contraire serait surprenant ; car la complexité de la forme de la molécule doit introduire dans son mouvement, et dans les forces intermoléculaires, des éléments de correction inévitables. Nous ne pouvons déduire, dans l'ignorance où nous sommes des prémisses qu'il faudrait poser.

Il est déjà merveilleux que, dans les cas simples, le calcul qui, ne l'oublions pas, ne peut et ne veut viser qu'à nous donner des moyennes statistiques, soit en accord si remarquable avec l'expérience.

On est contraint de conclure que les hypothèses placées à la base de la théorie cinétique des gaz expriment sans doute une simplification considérable du réel, mais expriment partiellement au moins des caractères profonds de la structure de ce réel, si bien que dans les cas les plus simples, l'accord est remarquable entre l'image intuitive qu'elle donne et la consultation de l'expérience.

IV

Le nombre d'Avrogado.

Cette conclusion s'impose encore davantage quand, au cours des calculs dont nous venons de parler, on en arrive à chercher des quantités qui sont évidemment liées à toutes celles dont nous venons de parler : le nombre des molécules d'un gaz sous une pression et à une température données, pour un volume déterminé, ainsi que leurs dimensions moléculaires.

La théorie cinétique des gaz postule à l'origine, — et c'est la signification qu'elle donne et à la loi de Mariotte, et à celle de Gay-Lussac et à l'équation d'état des gaz parfaits $P V = R T$, — que tous les gaz sous une pression et à une température identiques sont, à volume égal, constitués par le même nombre de molécules. Le même nombre, à très peu près,

étant donné qu'il s'agit déjà de nombres énormes pour de très petits volumes (27 quintillions, c'est-à-dire 27 milliards de milliards par centimètre cube). Estimé, comme il est d'usage, par molécules-grammes (22.400 centimètres cubes à 760 millimètres de pression et 0° centigrade), ce nombre est le nombre d'Avrogado. C'est une constante universelle puisque la molécule-gramme de toute matière à l'état gazeux doit compter le même nombre de molécules. Or, on a pour atteindre ce nombre une quinzaine de procédés expérimentaux fondés sur des principes essentiellement différents, sans aucuns rapports entre eux.

Et tous ces procédés avec une remarquable convergence nous font retomber sur des nombres compris entre 60 et 75, et sauf un, entre 60 et 69 $\times 10^{22}$. A mesure que les chances d'erreurs diminuent, ces nombres se serrent, comme nous l'avons dit, autour de 60,6 $\times 10^{22}$. Il y a là confirmation très nette du postulat initial de la théorie cinétique.

L'ordre des diamètres moléculaires est pour l'hydrogène de 2 cm 40 $\times 10^{-8}$ (1), pour l'oxygène de 2,97 $\times$ 10^{-8}, pour l'azote de 3,1 $\times 10^{-8}$, et pour l'acide carbonique de 3,19 $\times 10^{-8}$.

(1) 0 cm. 000 000 024.

CHAPITRE III

LES ANTICIPATIONS DU RÉEL PAR LE CINÉTISME

I

Ce qu'est un gaz.

Tout gaz est donc un chaos indescriptible dans les conditions où, dirions-nous volontiers, il réalise aussi complètement que possible ce que nous appelons l'état gazeux de la matière, et s'approche de plus en plus du gaz parfait. C'est aussi l'état où la matière se présente, à notre échelle, sous la forme la plus simple et la plus élémentaire, où nous pouvons le mieux en approcher la structure. D'où son importance théorique. Une multitude de molécules dont le nombre est, à une pression et à une température données, identique pour toute matière (27 milliards de milliards par centimètre cube aux conditions normales). Ces molécules se meuvent en moyenne à plusieurs centaines de mètres par seconde. Elles sont en moyenne à quelques millionièmes de millimètre les unes des autres. Elles s'entrechoquent plusieurs millions de fois à la seconde, en moyenne toutes les fois qu'elles ont parcouru un dixième de millimètre. Leur diamètre est de quelques dix millionièmes de millimètre. Leur surface totale, par centimètre cube, est de plusieurs mètres carrés (7 pour l'argon). Leur

masse et leur poids sont, pour l'hydrogène, de 1 gramme 66 × 10^{-23} (c'est-à-dire en faisant précéder 166 de 23 zéros après la virgule qui suit 0 gr.).

II

L'effet Döppler-Fizeau.

Certaines expériences nous permettent de saisir intuitivement le mouvement de ces molécules, dans une masse de gaz qui, en apparence, se comporte comme une masse élastique continue, homogène et en équilibre stable. Elles se rapportent à la lumière qu'elles émettent dans une flamme et à l'observation d'un gaz extrêmement raréfié.

De même qu'un son semble plus grave quand s'éloigne l'instrument qui l'émet (le sifflet d'une locomotive par exemple), plus aigu quand il se rapproche, les radiations de la lumière qu'émet une source qui s'éloigne se déplacent vers le rouge ; vers le violet, au contraire si elle se rapproche. C'est l'effet Döppler-Fizeau. Or dans un gaz incandescent, si la théorie cinétique en donne une image fidèle, les molécules qui émettent de la lumière (par les mouvements de leurs électrons) s'éloignent et se rapprochent de nous constamment. Les raies spectrales de cette lumière ne peuvent donc pas être rigoureusement monochromatiques. Elles doivent être au contraire élargies, puisqu'elles étalent sur un espace élargi des radiations de longueur d'onde différentes. En partant des grandeurs données par la théorie cinétique des gaz, on peut calculer cet étalement. L'expérience (Michelson, Fabry et Buisson) a vérifié de façon remarquable les résultats du pur calcul fait par Lord Rayleigh.

C'est une des plus belles confirmations expérimentales des postulats de la théorie cinétique.

III

Les gaz ultrararéfiés.

L'étude des gaz ultrararéfiés rend en quelque sorte visible la structure des gaz demandée par la théorie cinétique. Une masse gazeuse est ultrararéfiée lorsque ses propriétés d'ensemble sont sous la seule dépendance du nombre des chocs contre les parois de l'enceinte, et deviennent indépendantes des chocs mutuels entre les molécules. Le libre parcours moyen dépasse les dimensions de l'enceinte, de sorte que la rencontre entre deux molécules devient l'exception. L'intervalle de temps moyen entre deux chocs successifs n'est plus que de l'ordre de la seconde au lieu d'être de l'ordre du dix-millionième de seconde. Dans toutes les expériences faites sur ces gaz en équilibre de pression et de température (notamment celles de M. Dunoyer) se produisent des effets mécaniques dus à un bombardement moléculaire rectiligne, par exemple l'échauffement de la partie de la paroi opposée de l'enceinte par les molécules lancés en ligne droite à travers une ouverture étroite, la mise en marche d'un moulinet dans le radiomètre de Crookes, etc. Tout se passe comme si le gaz, dans des conditions d'équilibre strict, était cependant le siège d'un vent assez fort.

IV

L'effusion et la diffusion des gaz.

Les expérimentations quantitatives faites afin de vérifier les résultats des calculs qui se fondent sur la théorie cinétique des gaz, soit dans l'effusion des gaz (écoulement d'un gaz par une petite ouverture), soit dans la diffusion des gaz,sont autant de confirmations puissantes de la théorie. Les expériences de Knudsen ont vérifié le calcul qui détermine la masse ou le

volume de gaz effusés pendant un temps donné en fonction des grandeurs caractéristiques de la théorie.

Mais c'est surtout la diffusion des gaz dont nous ne pouvons avoir une représentation intelligible et explicative qu'à l'aide de la théorie cinétique. A elle seule, elle suffirait presque à nous l'imposer. Deux gaz de densité différente, par exemple de l'hydrogène et de l'acide carbonique à la *même* température et à la même pression, et dont les densités sont comme 1 à 22, sont superposés l'un à l'autre dans le même récipient (1) de façon que le plus léger soit à la partie supérieure. Ils sont donc dans un état mécanique absolument stable si leur structure rappelait celle d'un fluide continu ou d'un solide. Or ils se mêlent très rapidement (comme l'oxygène et l'azote dans l'air) sans que la température ou la pression trahissent la moindre variation. Comme nous l'avons déjà dit, le centre de gravité du système est remonté spontanément, sans qu'il soit fourni de travail extérieur ; chacun des deux gaz se comportant comme s'il était seul dans le récipient, et comme s'il était le vide vis-à-vis de l'autre.

La théorie cinétique fournit immédiatement une image intuitive de ce paradoxe. Et il semble difficile de concevoir une autre interprétation explicative. Les calculs à partir de la loi de distribution de Maxwell donnent des résultats satisfaisants pour la marche du phénomène, la vitesse et le coefficient de diffusion, dans le cas où s'applique le théorème de distribution, c'est-à-dire à des températures et des pressions uniformes (les vérifications quantitatives de Knudsen ont confirmé le calcul). Dans le cas où ces conditions ne sont pas réalisées, le calcul devient très complexe. Il faut serrer de plus près l'individualité des molécules et les particularités du choc moléculaire, les moyennes n'étant plus applicables.

(1) Formé par exemple d'un récipient à deux compartiments communiquant entre eux avec un robinet.

C'est en poursuivant cette tâche que Maxwell a été amené à poser une loi générale d'action intermoléculaire entre les molécules constitutives des gaz. Il faudrait attribuer à celles-ci, au presque contact, une force *répulsive* inversement proportionnelle à la 5[e] puissance de la distance. On a pu d'ailleurs, dans des perfectionnements récents de la théorie, s'affranchir de cette loi.

V

Conclusion.

Nous avons été amenés à une conception purement cinétique de la constitution des gaz. Les forces intermoléculaires ne jouent plus dès que les gaz sont suffisamment éloignés de leur point de liquéfaction. Les molécules sont alors suffisamment distantes pour que toute tendance à une cohésion interne n'ait plus à intervenir. Quel que soit alors le mécanisme du contact, quelle que soit la structure de la molécule et de l'atome, tout se passe comme si la molécule tout entière s'identifiait avec sa sphère de protection et comme si cette dernière se comportait de manière analogue à un solide élastique de même diamètre : à une bille de billard infiniment petite. Infiniment petite puisqu'à cause du très grand nombre de ces billes et de leur petitesse, leur somme, ou la somme de telles ou telles de leurs particularités que la théorie aura à retenir, peuvent d'ordinaire être prises pour des intégrales. Les probabilités y seront en général traitées comme des probabilités continues.

Fille de la physique mécaniste, la théorie cinétique des gaz est donc une théorie essentiellement mécaniste, le chef-d'œuvre des théories mécanistes. Avec les seules lois de la mécanique et les seules propriétés mécaniques nous arrivons à donner des gaz, de leurs propriétés et de leurs lois un modèle intuitif remarquablement satisfaisant. La physique actuelle n'a

fait que préciser d'une part, compléter de l'autre, ce modèle. Rien ne l'a amené à y renoncer. Tout au contraire, dans les années récentes, lui a donné plus de vogue, plus d'amplitude et plus de profondeur.

C'est aujourd'hui une théorie centrale, une théorie nécessaire de la physique, une des pièces maîtresses de la physique théorique et mathématique.

Or, l'un des plus grands succès de l'énergétisme, avec la mécanique chimique, plus généralement avec la chimie physique, dont la théorie des gaz est comme l'introduction nécessaire, c'était précisément la théorie des propriétés des gaz et des vapeurs, ce qui est tout un pour la science moderne. Les fonctions énergétiques nous représentent d'une façon claire et distincte, et traduisent par une mathématique admirable de simplicité et d'élégance, les lois des gaz, leurs propriétés, l'allure de leur comportement, les changements d'état, et leur correspondance. En partant de la pression, du volume, d'une part, de la température, de l'énergie interne (conservation de l'énergie) et de l'entropie (principe de Carnot et fonction de Clausius), nous avons une admirable théorie descriptive.

Voici donc face à face une théorie descriptive et une théorie explicative. Elles coïncident dans leurs résultats. Mais la théorie énergétique et descriptive se prête plus facilement aux calculs des applications. Elle est à peu près la seule employée pour cela. L'autre au contraire nous amène à une compréhension des phénomènes. A coups d'hypothèses, mais d'hypothèses logiques, et qui cheminent pas à pas avec l'expérience d'où elles reçoivent en fin de compte une confirmation chaque jour plus étendue et à la fois plus serrée, elle pénètre les raisons cachées des phénomènes. D'un mot nous dirons que l'une nous dessine avec précision *l'allure* des phénomènes tels que nous les voyons ; l'autre nous en donne la *raison*. Elle la cherche, mais il serait impossible de dire qu'elle court le risque de la manquer.

Il y a là une belle illustration, au point de vue de la théorie de la connaissance. Mais ce n'est pas ici notre objet.

Au point de vue du contenu de la science et de la recherche de ses conséquences pour la philosophie de la Nature, ce qui est le but propre de cette étude, le champ ouvert est encore plus considérable.

Nous revenons aux hypothèses, à une hypothèse réaliste et à une hypothèse de structure tout à fait dans la tradition que la physique a suivie depuis la Renaissance. L'accent doit moins porter sur les termes « hypothèses » ou « réaliste » que sur le terme « structure ».

L'énergétisme en effet, nous nous sommes efforcé de le montrer à propos du principe de Carnot et de la fonction de Clausius, fait des hypothèses : les modifications virtuelles, la transformation réversible, la machine parfaite ou cycle de Carnot, l'extension à tout l'Univers du modèle de la machine à feu, l'affirmation de l'irréversibilité de *tous* les processus réels et de leur ensemble etc., voilà bien des hypothèses.

Réaliste, l'énergétisme peut encore l'être, quoique avec moins de conséquence. En tout cas l'énergétisme d'Ostwald est réaliste. Il hypostasie l'énergie comme les Newtoniens avaient hypostasié la force à distance, comme Fresnel et ses successeurs ont hypostasié le rythme ondulatoire.

Mais dans l'hypothèse de l'énergie, ni Ostwald, ni aucun de ceux qui l'ont suivi ne donnent une structure de l'énergie. Ils sont strictement empiriques en prenant l'énergie dans son sens expérimental : ce qui produit du travail, ce qui produit un changement, ce qui modifie nos sensations. Et cela leur suffit. Sans plus, ils considèrent que le réel n'est rien autre que cela : un ensemble de sensations qui changent. L'être est absorbé dans la notion du devenir. On substantifie ce devenir sans y rien ajouter, sans en rien retrancher.

Au contraire, ce que la théorie cinétique des gaz

cherche avant tout, c'est sous les changements sensibles, une structure permanente, sous le devenir, l'être. Celui-ci est au premier comme l'apparence à la réalité. Certaines de nos sensations possibles sont logiquement conclues comme la substructure des sensations de notre expérience actuelle. Nous retrouvons là toutes les caractéristiques qui nous ont paru essentielles au mécanisme.

Comment alors se fait-il que les deux façons de voir philosophiquement les choses se rejoignent si bien dans les applications techniques, que la théorie des gaz fournisse à la fois une des pièces maîtresses de la description énergétique et de l'explication mécaniste. C'est d'abord que description et explication sont compatibles. Là où l'explication est assez avancée, il n'y a plus d'abîme entre l'hypothèse explicative et la théorie descriptive. Mais surtout n'oublions pas que la théorie mécaniste, au point de vue du contenu de la physique, prend son point de départ essentiellement dans les transformations réversibles. La réversibilité est l'idéal de la machine parfaite, donc du mécanisme qui conçoit au fond l'Univers pris *in toto* comme se suffisant éternellement à lui-même, comme réversible. Or, parmi les phénomènes réels qui tous sont irréversibles, nous affirme l'énergétisme, les phénomènes qui se passent dans les gaz sont ceux qui s'approchent le plus de la réversibilité : si bien que l'énergétisme quand il recherche à nous faire comprendre intuitivement ce qui serait une transformation réversible prend tous ses exemples dans un gaz parfait dont la température, le volume et la pression varient avec une infinie lenteur.

La presque réversibilité de certaines transformations des gaz presque parfaits dans des conditions presque idéales d'expérience était bien faite pour permettre de se développer avec un égal bonheur, en se prêtant un mutuel secours, la théorie énergétique et la théorie cinétique des gaz.

LIVRE II

LES PROBABILITÉS ET L'INDIVIDUEL

CHAPITRE PREMIER

INTERPRÉTATION CINÉTIQUE DU PRINCIPE DE CARNOT

I

Le mélange des gaz et l'irréversibilité.

Les lois de la diffusion et du mélange des gaz ont une importance considérable, au point de vue philosophique. Car c'est à partir d'elles que nous arrivons à une interprétation tout à fait nouvelle des faits qui ont suscité le mouvement des idées énergétistes.

C'est que le mélange des gaz constitue essentiellement, lui, une transformation par voie irréversible. C'est là que la friction doit se faire entre le point de vue de l'ancienne mécanique et le point de vue énergétique. Et c'est là qu'il faut, ou que la théorie ciné-

tique des gaz avoue l'impuissance de son effort explicatif, ou qu'elle passe outre à l'énergétisme, et le dépasse.

Pendant la plus grande partie du XIXe siècle, on l'a vu, le mécanisme avait échoué lorsqu'il cherchait un modèle de l'irréversibilité, c'est-à-dire une explication de ce caractère au moins très général que présente notre expérience de la Nature. Si ce que nous pensons est exact, à savoir que la tendance primordiale du mécanisme c'est de partir d'images réversibles des phénomènes fondamentaux, cela n'a rien qui doive nous étonner. Comment avec du réversible faire de l'irréversible.

C'est cependant, si nous poussons à fond la théorie cinétique des gaz, non peut-être ce qu'elle est parvenue à faire précisément d'un point de vue strictement scientifique, mais ce dont elle est arrivée au moins à nous fournir l'équivalent. En tout cas, si l'on approfondit ses fondements philosophiques et pour ainsi dire sa psychologie, ce qu'elle a, nous croyons bien, en fin d'analyse, à peu près réalisé. Nous allons voir comment.

Cette fois il s'agit d'allier à la considération des résultantes des moyennes, des lois du hasard et du grand nombre, l'aperception de l'élément individuel. Nous allons donc arriver, en essayant de donner une interprétation cinétique du principe de Carnot et de la fonction de Clausius, à une quatrième enveloppe du réel, et qui s'en approche bien plus que les précédentes. Nous allons essayer, sous les résultantes, d'atteindre la destinée des composantes, — de beaucoup plus près qu'il n'a été fait jusqu'ici.

La théorie cinétique de gaz continue, inlassable, sa marche de l'extérieur vers l'intérieur. Sous l'effort qui la porte à faire coïncider de plus en plus les résultats de ses calculs et ceux de l'expérience elle approfondit constamment la nature du réel. Les relations mathématiques s'y enfoncent comme un coin, et

notre connaissance de la structure des choses grandit, à mesure que se précisent et s'accumulent les rapports que l'expérience, les mesures expérimentales, permettent de formuler entre les choses.

A quoi est due au fond l'application des lois de probabilité et de la mécanique statistique aux phénomènes physico-chimiques ? A ceci, que les irrégularités individuelles se compensent les unes les autres comme nous l'avons déjà dit à propos des principales hypothèses logiques sur lesquelles se fonde la théorie cinétique des gaz. Au fond les individualités disparaissent. Car une individualité n'est jamais qu'un ensemble de différences spécifiques, qui lui sont propres et empêchent de la confondre avec tout autre. Une individualité est une possibilité dedifférenciation, une capacité de différences. Mais ces différences se compensent nécessairement si nous avons affaire à un *très grand* nombre d'individus, du moins en tant qu'elles peuvent marquer de leur empreinte ou de leurs traces la masse de tous les individus observés en bloc. Cet effet de masse est déjà tout à fait sensible dans les foules humaines, dans les sociétés. Un individu se marie ou ne se marie pas, par suite des traits particuliers de son caractère, ou des circonstances particulières dans lesquelles il se trouve placé. Mais quant à leur effet déterminé sur l'acte que nous envisageons ces particularités qui singularisent la conduite de chaque individu, se compensent lorsque nous considérons un très grand nombre d'individus. Elles s'équilibrent à tout moment pour ainsi dire, dans toute la masse. Il en résulte qu'elles laissent à peu près constants et identiques certains effets généraux que la statistique met en évidence. Aussi y a-t-il un nombre annuel à peu près fixe de mariages dans une société déterminée, à une époque déterminée, c'est-à-dire dans les conditions générales qui déterminent les raisons efficaces des résolutions individuelles. Le grand nombre des individus laisse apercevoir

une résultante, une loi numérique générale. C'est cette loi générale que nous révèle l'expérience. Il nous est impossible de dire, en face d'un individu, qu'il se mariera ou non dans l'année. Mais nous pouvons prédire avec certitude que sur quarante millions de Français il y aura, à notre époque, entre tel et tel nombre de mariages par an, les deux nombres étant assez rapprochés. De même pour la natalité ou la mortalité. De même pour la proportion de ceux qui se suicideront, ou qui périront de mort violente, par rapport aux autres, etc.

A mesure que nous descendons vers des individualités moins différenciées et beaucoup plus nombreuses, des lois de ce genre deviennent de plus en plus précises, de plus en plus fixes.Les lois des gaz sont remarquablement précises, fixes et simples, si nous envisageons l'état parfait, c'est-à-dire une température très haute et une pression très basse. C'est qu'ici les différences individuelles sont nécessairement infimes, vis-à-vis du nombre énorme d'individus en jeu, et de l'uniformité, de l'identité des conditions dans lesquelles ils se trouvent. Elles s'équilibrent de façon absolue ou quasi absolue.

Ainsi les lois de probabilité sont des lois de compensation. Les résultantes moyennes sont des effets de ces compensations, où s'évanouissent d'une façon nécessaire, et à la limite entièrement — si l'on a affaire à ces nombres colossaux, pratiquement infinis, de la théorie cinétique des gaz — les innombrables différences individuelles. La symétrie parfaite y vient de dissymétries innombrables, qui peuvent presque embrasser tout le champ des possibles, et qui d'ailleurs ont chacune un effet très petit vis-à-vis des effets globaux que seuls on observe.

Aussi peut-on considérer les molécules comme sphériques, quelles que soient leurs irrégularités de forme, pourvu qu'elles se rapprochent de toutes les irrégularités possibles, et par suite qu'elles se com-

pensent. Leur choc y est envisagé comme s'il se produisait entre corps élastiques, d'après l'observation globale qui définit un gaz, bien que nous ignorions les modalités réelles de ce choc. L'expérience vérifie globalement que tout se passe comme si nous le pouvions postuler tel.

Bref nous arrivons à cette conclusion que les lois — si précises et si complètement déterminées — qui régissent les gaz dans notre expérience ordinaire ne sont que des moyennes statistiques. Ces moyennes sont la compensation de petites différences individuelles. Elles résultent seulement du très grand nombre d'individus en observation.

Ces lois se traduisent toutes par des fonctions continues de quelques variables : la pression, le volume, la température, l'énergie interne et l'entropie. Mais ces fonctions continues ne sont, elles aussi, que l'enveloppe commune d'un nombre fantastique de discontinuités. Car différences individuelles et discontinuités sont même chose. La ligne tirée à l'encre sur le papier nous paraît l'image même de la continuité. Vue au microscope, sur le grain du papier, c'est une multitude de points de toutes formes, qui parsèment une charpie fibrillaire laissant partout des lacunes, des vides que l'encre n'a pas atteints.

II

Le principe de Carnot.

Mais alors la question se pose : toutes les lois que nous appliquons aux gaz (et par suite à la matière puisqu'elle est toujours susceptible de prendre l'état gazeux), toutes les fonctions par lesquelles nous exprimons ces lois, ne sont-elles pas de même nature ? Et cela jusqu'aux principes mêmes que nous avons été conduits à poser comme fondamentaux, que nous avons été contraints de poser comme tels, sur la foi d'une expérience toujours globale, quelle que soit

la petitesse des masses en expérience. Car cette petitesse est toujours une énormité colossale par rapport à l'infinité des éléments moléculaires auxquels nous conduit la déduction, à partir de cette même expérience.

Pour le principe de la conservation de l'énergie, la question ne se pose pas. C'est une somme. Et quel que soit le fractionnement que nous introduisions dans la composition de cette somme, peu importe pour le résultat de l'addition. Il sera toujours le même. Le total des individus auxquels s'applique une statistique n'est pas une moyenne. Il est ce qu'il est, et reste toujours ce qu'il est.

Mais le principe de Carnot et la fonction entropie sont d'une nature bien différente. Ils expriment une tendance universelle. Or une tendance peut être une résultante moyenne : par exemple la tendance au mariage, au suicide, à la procréation dans une statistique sociale, la tendance commune des organismes à la mort, dans les tables de mortalité. On comprend de suite que ces tendances puissent résulter de moyennes. L'âge moyen de la mortalité a pour cause les compensations des différences individuelles, de même le coefficient de natalité, de mariage, de suicide.

Les physiciens vers le dernier tiers du XIXe siècle cherchaient volontiers, pour donner une interprétation nécessaire du principe de Carnot, certaines configurations mécaniques exceptionnelles qui puissent représenter ce principe. La théorie cinétique des gaz nous fournit une méthode inverse : le principe de Carnot s'appliquant universellement dans l'expérience habituelle, n'y aurait-il pas des phénomènes exceptionnels par rapport à cette expérience auxquels il ne s'appliquerait pas. Si bien qu'on pourrait considérer que lui aussi résulte de la loi des grands nombres. Ces phénomènes exceptionnels rentreraient dans la catégorie des différenciations individuelles trop petites pour être observées isolément. Celles-ci

se compenseraient dans toutes les observations globales qui, seules, nous sont permises.

Le principe de Carnot et la fonction de Clausius, l'entropie, sont liés à la considération des températures. Or la température d'un gaz, en théorie cinétique, n'est autre qu'une partie de l'énergie cinétique *moyenne* de translation des molécules. C'est une de ces fonctions continues qui cachent une discontinuité foncière quand on envisage les éléments. Les molécules ont des vitesses, donc des énergies cinétiques constamment variables dans le chaos moléculaire. La température globale est une résultante statistique par compensation des différences individuelles sans nombre. Il y a là un indice qui devait pousser à chercher de ce côté. C'est Maxwell qui le premier en a eu l'intuition (1866). Boltzmann ensuite a posé le problème en toute précision (1877) sur le terrain sur lequel il devait être complètement résolu par Gibbs (1902) et Einstein (1902-1905).

III

Le démon de Maxwell.

La réflexion de Maxwell a son point de départ dans le fait de la diffusion des gaz et de son irréversibilité, d'une part, dans son théorème sur la distribution des vitesses, de l'autre. Si la théorie cinétique est admissible, il faut qu'en partant du théorème, nous rendions compte du fait. Il faut donc que nous arrivions à une interprétation cinétique de l'irréversibilité. Que se passe-t-il, du point de vue cinétique, lorsque mettant en communication deux ballons égaux remplis chacun d'une masse de gaz égale, mais dont l'une est à 20 degrés et l'autre à 10, nous ne trouvons bientôt plus dans les deux ballons qu'une température uniforme voisine de 15 degrés ? Les molécules dont la vitesse moyenne était plus grande dans le ballon le plus chaud, et les molécules dont la

vitesse moyenne était moins grande dans le ballon le plus froid se sont mêlées très rapidement de telle sorte que la vitesse moyenne est devenue moins grande dans le premier ballon et plus grande dans le second. Jusqu'à ce que, très rapidement, cette vitesse moyenne se soit égalisée dans les deux ballons, et soit devenue égale à la moyenne des deux vitesses moyennes initiales. Il y a alors équilibre thermique. Mais, comme il est facile de le conclure intuitivement, il y a dans les deux ballons autant de molécules d'une vitesse donnée qu'auparavant. Grossièrement parlant, le nombre moyen de molécules pour chaque vitesse n'a pas changé. C'est leur distribution, leur arrangement, leur répartition qui a changé. Au lieu qu'une moyenne plus rapide soit réalisée dans l'un des deux ballons, une moyenne plus lente dans l'autre, il y a une moyenne commune intermédiaire entre les deux précédentes, mais formée des *mêmes* éléments *individuels*. Si j'ai un sac qui contient 100 pièces de un franc et un autre qui contient 100 pièces de vingt francs et que je les mélange, ma fortune totale n'aura pas varié ; mais la somme que renferme chaque sac ne sera plus la même : le sac qui ne contenait d'abord que des pièces d'argent se sera enrichi, l'autre se sera appauvri.

Or, je peux trier de nouveau mes pièces et restituer l'état initial. Mon système est réversible. Je ne puis pas faire la même chose avec les molécules du gaz. Le système, là, est irréversible. C'est ce qu'affirme le principe de Carnot. Mon gaz étant en équilibre thermique, cet équilibre, si aucune influence extérieure ne s'exerce, subsiste. Mon gaz est dans des conditions telles qu'il ne peut ni gagner ni perdre de chaleur. Il restera toujours avec la même température moyenne.

Que faudrait-il pour qu'elle changeât ? Il faudrait qu'un des ballons se réchauffât, et l'autre se refroidît. Or cela ne peut se faire, d'après le principe de

Carnot, que si je mets, après avoir interrompu toute communication entre mes deux ballons, le ballon que je veux refroidir en contact avec une source plus froide que lui, celui que je veux réchauffer en contact avec une source plus chaude. Pour cela, il me faut faire appel à des travaux extérieurs. Car la chaleur ne passe jamais d'elle-même d'un corps froid à un corps plus chaud, mais toujours et seulement d'un corps chaud à un corps plus froid. C'est là l'énoncé le plus intuitif du principe de Carnot, mais qui, malgré son caractère vulgaire, est rigoureusement exact du point de vue de la thermodynamique énergétique. Jamais l'expérience ne l'a démenti — sous les réserves que nous allons voir, et que la thermodynamique énergétique n'a pas faites.

A quoi donc tient cette impossibilité qu'énonce le principe de Carnot ? Et cette impossibilité en est-elle bien réellement une ?

Intuitivement encore, on voit de suite qu'en théorie cinétique cette fois, et non plus en thermodynamique énergétique ou classique, si l'on pouvait trier à nouveau les molécules, comme nous l'avons fait pour nos pièces d'or et d'argent, en mettant dans l'un des deux ballons les plus rapides, dans l'autre les plus lentes, nous réchaufferions le premier, et refroidirions le second. Nous ferions passer de la chaleur d'un corps froid sur un corps plus chaud. Nous réchaufferions en refroidissant, sans consommation de travail équivalente. Nous tournerions le principe de Carnot, ou plus exactement, celui-ci ne serait plus valable dans l'expérience que nous imaginons. Elle échapperait au domaine d'application du principe.

Autrement dit ce principe ne serait plus un principe, au point de vue méthodologique, si l'on définit le principe par l'universalité de l'application, et sa légitimité par ce fait qu'aucune expérience ne le contredit, plus précisément qu'on peut toujours imaginer un biais qui le mette d'accord avec l'expérience.

Ici plus de biais possible. Et le principe de Carnot serait simplement une loi expérimentale vérifiée entre certaines limites, et sous certaines réserves, comme tant d'autres, en particulier, comme toutes les lois globales de la théorie cinétique.

Pouvons-nous donc faire le tri ? Souvenons-nous simplement que par centimètre cube de gaz il y a 27 milliards de milliards de molécules, qu'elles sont bien en deçà de toute visibilité, de tout moyen qui nous permette d'agir sur elles individuellement. Elles appartiennent à un monde qui est à une toute autre échelle que le nôtre. Entre les molécules *individuelles* et nous, il n'y a pas, *pour le moment*, de contact.

Mais nous avons été obligés de dire : *pour le moment*. Supposons que nous découvrions un moyen de trier les molécules par ordre de vitesse, et tout change. Nous pouvons procéder dès lors comme pour nos pièces d'or et d'argent. C'est la conclusion à laquelle Maxwell arrive en imaginant un être assez petit, à l'échelle des grandeurs moléculaires et non plus à la nôtre. Ce démon, placé au point de communication des deux ballons, s'arrangerait pour ne laisser passer de droite à gauche que les molécules les plus rapides, et de gauche à droite que les plus lentes. Il aurait aussi vite replacé nos deux masses de gaz dans l'état initial, que celles-ci, d'*elles-mêmes*, avaient passé à l'état final d'équilibre thermique. Le démon de Maxwell tourne le principe de Carnot. Il fait plus que le tourner. Il agit en dépit ou en violation, comme on voudra, du principe de Carnot. Celui-ci n'existe plus dans la nature à son échelle, car il se trouve en contact direct avec les molécules, car il a prise sur chacune d'elles isolément.

Le résultat de son action, c'est en somme de faire remonter à la nature le cours auquel le principe l'a contrainte, dans les transformations spontanées et purement naturelles.

Mais le *démon* de Maxwell, du point de vue de la thermodynamique classique et énergétiste, est un personnage purement imaginaire. Comme la jument de Roland, il a toutes les qualités, sauf une : celle d'exister.

Le démon de Maxwell est une volonté. Volonté, il ne suit pas la matière, il la contraint, il la violente.

Or, n'est-ce pas, selon la vieille parole Baconienne, qu'on ne peut vaincre la nature qu'en lui obéissant. L'artifice du démon. comme tous nos artifices mécaniques, utilise une possibilité naturelle, une propriété de la nature qui, quoique nous ne puissions l'utiliser nous-mêmes, n'en est pas moins bien réelle. Voilà le point qui importe dans le mythe de Maxwell et où le mythe n'est plus un mythe. Il n'en reste pas moins que le *tri* est le fait d'une volonté *intelligente*. C'est un choix.

La nature aveugle est-elle, *d'elle-même*, capable de ce choix ? Et les transformations naturelles peuvent-elles admettre la possibilité d'une élection d'un caractère aussi discriminatif que l'acte psychologique du démon de Maxwell ?

Du point de vue de la thermodynamique classique il n'est pas douteux que cette capacité de choix est rigoureusement exclue. Mais la question se pose de savoir si ce point de vue est bien strictement exact et sans limitation aucune ? Est-il réellement universel, au sens plein du mot ?

Nous avons admis jusqu'ici que toute l'expérience le vérifiait. Est-ce vrai ?

Eh bien non ! Dans l'expérience habituelle, dans l'expérience du sens commun, tel qu'est ce que nous appelons *actuellement* le sens commun, il est littéralement exact. Mais l'expérience plus affinée, celle d'un sens commun qui aurait dans des mesures énormes élargi et approfondi son champ d'action, à l'aide d'instruments infiniment plus grossissants et plus sensibles, le démentirait peut-être.

IV

Le mouvement brownien.

C'est du moins la conclusion à laquelle nous sommes amenés par certaines expériences qui sont à la limite de celles que nous permettent nos instruments actuels. D'elles toutes, ce qu'on a appelé le mouvement brownien (1) est la première en date. « Il suffit (2) en effet d'examiner au microscope de petites parcelles placées dans de l'eau pour voir que chacune d'elles, au lieu de tomber régulièrement, est animée d'un mouvement très vif et parfaitement désordonné. Elle va et vient en tournoyant, monte, descend, remonte encore, sans tendre aucunement vers le repos.

« L'agitation ne peut donc être due à des trépidations de la plaque qui porte la gouttelette observée, car ces trépidations, quand on en produit exprès, produisent précisément des courants *d'ensemble*, que l'on reconnaît sans hésitation et que l'on voit simplement se superposer à l'agitation irrégulière des grains. D'ailleurs le mouvement brownien se produit sur un bâti bien fixe, la nuit, à la campagne, aussi nettement que le jour, à la ville, sur une table sans cesse ébranlée par le passage de lourds véhicules (Gouy). De même, il ne sert à rien de se donner beaucoup de peine pour assurer l'uniformité de température de la gouttelette : tout ce qu'on gagne est encore seulement de supprimer des courants de convection d'ensemble parfaitement reconnaissables, et sans aucun rapport avec l'agitation irrégulière observée (Wiener, Gouy). On ne gagne rien non plus en diminuant extrêmement l'intensité de la lumière éclairante, ou en changeant sa couleur (Gouy).

« Bien entendu, le phénomène n'est pas particulier à l'eau, mais se retrouve dans tous les fluides, d'autant

(1) Du nom de Brown, botaniste anglais qui l'a découvert en 1827, mais sans même en entrevoir l'explication.
(2) Jean Perrin, *Les atomes*, 13e édit., p. 120.

plus actif que ces fluides sont moins visqueux. Aussi est-il à peine perceptible dans la glycérine, et au contraire extrêmement vif dans les gaz (Bodoszewski, Zsygmondy)....

« Enfin, précisément — et ceci est peut-être le caractère le plus étrange et le plus véritablement nouveau — le mouvement brownien ne s'arrête jamais. A l'intérieur d'une cellule close (de manière à éviter l'évaporation), on peut l'observer pendant des jours, des mois, des années. Il se manifeste dans des inclusions liquides enfermées dans le quartz depuis des milliers d'années. *Il est éternel et spontané.*

« Tous ces caractères forcent à conclure avec Wiener (1863) que « l'agitation n'a pas son origine dans les particules, ni dans une cause extérieure au liquide, mais doit être attribuée à des mouvements internes, caractéristiques de l'état fluide », mouvements que les grains suivent d'autant plus fidèlement qu'ils sont plus petits. *Nous atteignons par là une propriété essentielle de ce qu'on appelle un fluide en équilibre : ce repos apparent n'est qu'une illusion due à l'imperfection de nos sens, et correspond en réalité à un certain régime permanent de violente agitation désordonnée.* »

La petite parcelle agitée par le mouvement brownien nous met pour ainsi dire sous les yeux les chocs individuels des molécules, qui lui impriment à chaque instant un mouvement particulier, imprévisible, puisque nous ne pouvons pas suivre les molécules isolées. Ce mouvement *chaotique* c'est l'image même du *chaos* moléculaire qu'est un gaz et plus généralement un fluide.

Dès que la particule devient un peu trop grosse, les irrégularités des chocs individuels commencent à se compenser. Ils ne sont bientôt plus décelables. Et nous retombons sur les images ordinaires de notre expérience. La particule restera indéfiniment en repos, du moment que son centre de gravité est le plus bas qu'il puisse être, là où nous l'observons. Sinon, elle

ne prendra plus que le mouvement total, dirigé, ordonné de la gravitation, ou tout autre mouvement dirigé qui lui sera imprimé par les forces extérieures.

Mais tant qu'elle reste assez petite pour osciller au hasard des chocs moléculaires non compensés, la parcelle monte aussi bien qu'elle descend. Son centre de gravité changeant constamment de niveau, en dépit de la loi de la pesanteur, et aussi bien contre elle qu'en accord avec elle.

C'est ici que les choses deviennent du plus haut intérêt au point de vue philosophique. Elles nous ramènent au démon de Maxwell et à l'examen du principe de Carnot. Car le mouvement brownien viole constamment le principe de Carnot tel qu'il est défini par la thermodynamique classique. C'est le démon de Maxwell en action. Bien plus un démon qui n'est pas une volonté, une puissance de choix, mais une loi naturelle aveugle et fatale. Le démon de Maxwell, industrieux, tourne le principe de Carnot, comme tout art humain appliqué à la nature. Il y a au contraire dans le mouvement brownien un phénomène *universel*, qui va directement contre la loi de Carnot érigée en principe *universel*. Nous disons bien : un phénomène universel, puisqu'il s'agit ici d'une conséquence directe de la structure de la matière à l'état gazeux. Il y va donc ici d'une conséquence directe de la structure de toute matière.

Si un principe se définit en bonne méthode par une interprétation universelle, nous sommes là bien près d'être en face d'un principe : le *principe cinétique*, principe du chaos moléculaire de la structure moléculaire de la matière que ne dément aucune expérience où ce chaos peut être atteint. Le principe de Carnot n'est plus alors qu'une loi de statistique, un théorème de probabilité, dont le champ d'application dépend d'une hypothèse limitative.

Que nous dirait-il en effet dans le cas du mouvement brownien, s'il y était applicable ? En le prenant sous

sa forme la plus intuitive, mais tout aussi stricte et exacte que les autres, il nous dit qu'il est impossible de transformer de la chaleur en travail sans faire passer de la chaleur d'un corps plus chaud sur un corps plus froid. Par conséquent, il est impossible de voir apparaître du travail mécanique dans un système *isolé*, si celui-ci est en équilibre thermique. Or, le système dans lequel nous observons le mouvement brownien peut être à la limite un système absolument isolé. *Toutes* les expériences, nous venons d'y insister, sont nettes et concluantes à cet égard. Et cependant la parcelle agitée de ce mouvement remonte spontanément contre les forces de la pesanteur. Elle ne le peut faire qu'en consommant du travail mécanique. Autrement dit, son élévation à un niveau supérieur est un travail mécanique. Ce travail ne se crée pas de rien, d'après le principe de la conservation de l'énergie. Il vient d'une transformation de l'énergie calorifique du milieu ambiant, qui pourtant est à température constante. Et cela indéfiniment. Nous avons là une machine périodique qui transforme de la chaleur en travail, en fonctionnant avec une *seule source de chaleur* à température constante que tantôt elle refroidit localement, et tantôt elle réchauffe localement aussi.

Ce refroidissement et ce réchauffement se compensent indéfiniment puisque nous sommes en présence d'un mouvement indéfini, qui se recommence perpétuellement, *sans aucun emprunt* à des sources d'énergie auxiliaires et extérieures. La chaleur y passe *d'une petite région plus froide à une région plus chaude*, aussi bien que des petites régions plus chaudes aux régions plus froides. Toutes les formules du principe de Carnot se trouvent en échec, puisque le principe lui-même est ici inapplicable.

Un cycle, classiquement irréversible, peut être parcouru, sans dépense de travail auxiliaire.

En interprétation cinétique une molécule aban-

donne de sa vitesse, en communiquant une impulsion à la parcelle, donc se refroidit, puisque la température est fonction de la vitesse. Cette impulsion acquise aux dépens du refroidissement des quelques molécules dont l'action est analogue, fait remonter la parcelle en travaillant contre les forces de gravitation, et le mouvement de la parcelle peut lui-même accélérer les molécules qu'elle choque, les réchauffant aux dépens de celles qui ont été refroidies.

V

La nouvelle interprétation du principe de Carnot.

Quelle interprétation donner alors du principe de Carnot ? Aucune expérience ne le dément à notre échelle. — Les mouvements moléculaires, individuellement suivis, ne s'y soumettent jamais. Sommes-nous en présence de deux mondes contradictoires ?

Pas du tout. C'est pour les mêmes raisons que les molécules, prises individuellement, ne se soumettent pas à la loi de Carnot, n'obéissant qu'au principe du cinétisme (aux principes de la mécanique), — et que, prises en grand nombre, elles s'y soumettent absolument, dans leur résultante, dans leur effet global. La loi de Carnot n'a donc qu'un domaine d'application restreint dans l'expérience. Elle ne s'applique qu'à partir du moment où, ne pouvant plus suivre les effets individuels, nous nous bornons à faire une statistique, d'autant plus exacte que le nombre des individus observés est plus grand. A l'échelle de notre expérience habituelle, nous sommes bien au delà du minimum requis pour que la statistique soit pleinement valable. Aussi l'est-elle toujours. La loi de Carnot est un effet statistique, une loi de statistique, comme la constance du nombre des mariages, des naissances, des décès, dès qu'on observe une population assez nombreuse.

Mais l'expérience qui suit isolément les individus

moléculaires ignore le principe de Carnot, de même que la prédiction du moment exact de la mort est impossible pour tel ou tel individu particulier.

Il est même, à notre sens, métaphorique, d'exposer les choses comme nous venons de les exposer et comme l'exposent nombre de physiciens. Quand on suit individuellement les molécules, il n'y a pas lieu, en toute rigueur, de parler de température (donc de refroidissement ou de réchauffement), car la température se relie toujours à un équilibre moyen qui suppose le grand nombre. Il n'y a plus lieu, non plus, de parler d'énergie calorifique. Elle n'existe plus si l'on supprime son facteur d'intensité : la température. D'ailleurs son autre facteur, le facteur d'extensité (puisqu'elle est le produit de ces deux facteurs), l'entropie, n'existe pas davantage pour l'individu moléculaire. Nous allons voir qu'il est lui aussi fonction de la probabilité, donc du grand nombre, qui, seul, introduit ici la probabilité. En réalité nous n'avons plus en face de nous avec l'individu-molécule que de l'énergie mécanique, cinétique ou potentielle.

Le principe de Carnot ne s'applique que là où l'on peut parler d'énergie calorifique, de température et d'entropie. L'ériger en *principe universel* est une inexactitude méthodologique. Dès que l'énergie calorifique redevient, au sens cartésien, l'apparence qui recouvre l'énergie mécanique, et la seule énergie mécanique, il ne règne plus (aux approximations qu'introduira plus tard la théorie de la relativité) que les principes de la mécanique. Eux, seuls, sont encore, méthodologiquement, des principes universels. Et la loi de Carnot n'apparaît plus. Elle n'est pas inexacte. Elle n'est plus.

Cette conclusion s'impose immédiatement, si nous prenons la forme la plus abstraite qu'on lui ait donnée (Langevin-Perrin), quand on en fait le principe d'évolution des systèmes *à partir d'une certaine complexité*, si nous prenons, comme nous y sommes amenés, pour

éléments les molécules : « Un système ne repasse jamais deux fois par le même état ». Mais, dans le mouvement brownien, le système (parcelle et molécule) peut repasser et en réalité repasse par le même état défini par la même somme d'énergie potentielle et cinétique.

Le dénivellement se fait indifféremment dans tous les sens, parce qu'en théorie cinétique le dénivellement des molécules constitutives des gaz se fait indifféremment dans tous les sens (1).

Le principe de Carnot est donc relatif au degré de complexité des systèmes.

VI

La signification des principes.

Cependant si nous y regardons de près, l'énoncé de Carnot est autre qu'une loi ordinaire. Il est plus en un sens et moins en un autre. Il est plus parce qu'il s'applique à toutes les catégories de phénomènes à partir d'une certaine complexité, comme le principe de la conservation de la masse au-dessous d'une certaine vitesse. Il régit *tous* les phénomènes physico-chimiques à notre échelle. Et dans ce domaine, les autres lois physiques *s'y subsument.*

La vraie caractéristique d'un principe, au point de vue méthodologique, ce n'est pas d'être universel : seuls des principes comme ceux de la conservation de l'énergie et de la conservation de la quantité de mouvement, de la conservation de la masse (étendue à la somme des portions de matière d'un système parfaitement isolé), de l'action et de la réaction (sous la même réserve) pourraient alors mériter ce nom.

Un principe en physique est d'une définition plus

(1) Ceci n'est pas rigoureusement exact parce que les molécules sont pesantes. Mais les molécules les plus rapides (à plus grande énergie cinétique) à la limite de l'atmosphère terrestre peuvent être soustraites à la gravité.

complexe. Il se caractérise par deux propriétés essentielles. Il est universel, mais dans un domaine ; et dans ce domaine il est universel parce qu'il sous-tend toutes les lois particulières à ce domaine. Celles-ci le supposent toutes et il ne les suppose pas. C'est donc une fonction logique, identique dans tout un domaine, par quoi nous devons caractériser un principe. Et ce domaine d'applicabilité du principe, nous ne pouvons jamais établir qu'il est, au sens plein du mot, universel.

Nous ne pouvons l'établir ni *a priori* ni *a posteriori*. *A priori*, dira-t-on que le principe est une évidence rationnelle ? Ceci serait impossible pour le principe de Carnot et ne pourrait l'être que pour des principes dérivés de celui d'identité et de contradiction ; mais, même dans ce cas, qui nous assure que l'expérience est rationnelle et qu'une loi rationnelle est applicable universellement ? Bien plus, si l'expérience est rationnelle, qui nous assure que notre raison a épuisé son contenu, et qu'il ne faudra pas en appeler d'une raison mal informée à une raison mieux informée d'elle-même, d'une raison partielle à une raison plus profonde ?

A posteriori, il n'y a pas d'universalité possible. L'expérience est toujours à la merci, a toujours été à la merci d'une expérience nouvelle ; en réalité, ces principes ne sont ni entièrement *a priori*, ni entièrement *a posteriori*.

Il y aurait de ce point de vue toute une critique à faire de la théorie que Poincaré donne des principes. Que les principes soient *a priori*, et par conséquent en partie conventionnels vis-à-vis de l'expérience, donc dans une certaine mesure arbitraires, c'est, dans l'état actuel de l'épistémologie, incontestable. Un principe est une universalisation, une interpolation et une extrapolation de l'expérience. En conséquence il la dépasse, et dans la mesure où il la dépasse, il est arbitraire et conventionnel, *a priori*. Il est définition, ou conséquence de définitions.

Il n'est pas seulement une extrapolation, il est encore une schématisation de l'expérience. Pour arriver à formuler un principe, il faut négliger les particularités de l'expérience réelle, abstraire précisément les éléments capables d'universalisation. Il faut, avec ce schéma, s'élever à une symbolique de l'expérience qui puisse servir de substitut à l'expérience réelle. Au fond il faut arriver à remplacer l'expérience réelle par une expérience conceptuelle, idéelle, partant idéale, une expérience virtuelle. La pensée doit remplacer l'intention sensible, et l'idée, la sensation. Le principe s'établit à partir d'un système, d'une organisation d'idées. Elles ont bien été conçues à l'occasion de la perception et de la sensation, mais elles ne sont plus ni perceptions ni sensations. Témoins, la conception de modification virtuelle et de modification réversible, à l'aide, et à la seule aide desquelles, est établi le principe de Carnot.

Maintenant, que les principes soient également *a posteriori*, c'est aussi incontestable. Le principe est une émanation de l'expérience. C'est un centre de convergence d'une multitude d'expériences. Et si un fait scientifique, voire une loi, peuvent être établis après une seule bonne expérience, la loi de Mariotte par exemple, ou le fait de la composition de l'eau, le principe, lui, ne peut être admis (et non établi) que sur un ensemble d'expériences vérifiant lois et faits qui l'impliquent ou le supposent. Il est donc largement *a posteriori*. Partant, il est fonction des vérifications et des applications expérimentales. Il n'est valide qu'autant qu'il est applicable. En dehors du domaine d'application, il n'a plus de sens. Il n'est donc pas universel au sens plein. Il n'est universel que pour un groupe *pro parte* et non *in omnibus partibus*. Il a ses conditions d'applications auxquelles son universalité est *relative*.

C'est ce qui est maintenant bien établi pour le principe de Carnot.

VII

Le principe de Carnot, loi d'improbabilité.

Son domaine d'ailleurs est immense, s'il est rigoureusement délimité. C'est notre expérience *habituelle*, ou comme on dit encore : *à l'échelle macroscopique*. Il est inapplicable à l'élément *microscopique* de toute matière, si l'on saisit et si l'on suit cet élément en dehors des complexes qu'il forme avec ses pareils.

Dans sa véritable signification, le principe de Carnot est une loi d'improbabilité. Voici une bille blanche et une bille noire dans un cornet, la bille noire est à droite, la bille blanche à gauche. Et avant et après chaque secousse, regardons et notons les dispositions de nos deux billes. C'est au fond le jeu de la rouge et de la noire. Au bout d'un certain nombre de coups, nous observons qu'il y aura à peu près égalité entre la première disposition : noire à droite et blanche à gauche, et l'autre disposition possible : noire à gauche, blanche à droite. Et plus les coups sont nombreux, plus s'affirmera cette tendance à l'égalité. En d'autres termes, l'état initial sera ramené une fois sur deux. Le principe de Carnot n'a ici aucune application. Le système une fois sur deux repasse par son état initial, car nous y suivons individuellement les deux seuls éléments qui le constituent.

Prenons maintenant six billes, numérotées de 1 à 6, que nous rangeons *suivant cet ordre*, dans un récipient dont le fond (un rectangle allongé) ne peut contenir que ces six billes alignées côte à côte. Secouons notre système. Les billes retomberont au hasard, et au hasard viendront s'aligner côte à côte dans le fond. Observons et notons les dispositions. Au bout d'un très grand nombre de brassages (une centaine de milliers, par exemple), nous vérifierons un théorème d'analyse combinatoire qui nous apprend que par rapport au nombre total des brassages, celui qui nous fait revenir à l'état initial : nos six billes alignées dans

l'ordre initial (1, 2, 3, 4, 5, 6), se présentent dans la proportion $\frac{1}{6!}$ c'est-à-dire $\frac{1}{1\times2\times3\times4\times5\times6} = \frac{1}{720}$ une fois sur 720. Le système ne repassera plus par son état initial une fois sur deux, comme dans la première expérience, mais une fois sur 720. Le principe de Carnot sera encore grossièrement et complètement violé. Beaucoup plus rarement (une fois sur 720), mais d'une façon encore observable. Néanmoins nous aurons beaucoup plus souvent une distribution, une *complexion* du système autre que l'état initial. Nos billes se mélangeront d'une façon beaucoup plus *désordonnée*. Une complexion désordonnée sera beaucoup plus probable que la distribution bien ordonnée de l'état initial.

Prenons maintenant un kilo de fine poudre noire et un kilo de fine poudre blanche aux grains d'égale densité et de grosseur égale, ou à peu près. Plaçons-les côte à côte ; et nous avons un état initial qui représente très bien deux masses égales d'un gaz quelconque séparé, et dont l'une est à une température de 10 degrés par exemple et l'autre à une température de 30 degrés. La différence de couleur symbolise la différence de température. Brassons énergiquement et mélangeons nos deux poudres. Au bout de quelques minutes, nous avons une poudre provenant en apparence d'une matière unique, et qui nous semble uniformément grise. Et nous pouvons brasser et rebrasser, nous n'aurons plus jamais sous nos yeux qu'une seule poudre qui nous paraîtra uniformément grise. De même dès que nous avons mis en communication nos deux masses de gaz à température initiale différente, nous ne trouvons plus qu'un seul gaz à la température uniforme de 20 degrés. Et si notre système est thermiquement bien isolé, ce sera toute notre vie la même température de 20 degrés que repérera dans toute l'étendue du gaz notre thermomètre.

Nos deux systèmes ont strictement obéi au prin-

cipe de Carnot. Toute matière observable à notre échelle obéira toujours de même et rigoureusement au principe de Carnot. Pas plus que notre système des deux poudres, elle ne repassera par son état initial.

Pourquoi ? C'est que la *complexion* (la distribution des éléments) de l'état initial devient d'une si haute improbabilité qu'elle équivaut pour l'homme, pour l'humanité tout entière, pour un système ayant l'âge de notre système solaire, voire stellaire, à une impossibilité). Tout à l'heure avec nos six billes seulement, en supposant que chaque brassage qui leur était imprimé durât une seconde, il nous fallait en moyenne 720 secondes, soit 12 minutes pour revoir réapparaître une complexion bien ordonnée de 1 à 6.

Ici, avec deux centimètres cubes de gaz seulement (c'est-à-dire deux fois vingt-sept milliards de milliards de molécules) la chance de voir réapparaître l'état initial, où, après avoir été diffusés l'un dans l'autre, on les retrouverait séparés l'un à 10 degrés et l'autre à 30, ne serait plus, comme tout à l'heure toutes les 12 minutes, ce serait au moins toutes les $10^{10^{10}}$ années : une durée inimaginable.

Le principe de Carnot ne fait qu'exprimer cette haute, cette inimaginable improbabilité. Voilà pourquoi il n'est jamais démenti dans une expérience à notre échelle.

CHAPITRE II

L'INTERPRÉTATION CINÉTIQUE DE L'ENTROPIE

I

Entropie et probabilité.

Le principe de Carnot, l'étude du cycle et de la fonction de Carnot, ont permis à Clausius, nous l'avons vu, de définir abstraitement une fonction mathématique qui joue un rôle de toute première importance dans la physique et dans la philosophie de la physique. En cherchant à lui donner une signification tant soit peu intuitive, il nous a paru qu'elle représentait l'histoire de l'évolution d'un système. Elle croît constamment à mesure que ce système évolue, si ce système est *isolé*, et ne reçoit rien de l'extérieur. Elle est fonction de l'évolution de ce système, et pourrait aussi bien être appelée fonction d'évolution. D'ailleurs c'est souvent le sens étymologique qu'on attribue au mot entropie choisi par Clausius.

Mais la notion doit être prise, en thermodynamique classique, d'une façon plus anthropomorphique encore; elle évoque l'idée, de manière très différente sans doute, mais enfin, *mutatis mutandis*, l'idée d'une évolution quasi-organique. Le système physico-chimique a une sorte de vieillissement tel que son aptitude à se transformer diminue à mesure qu'il se transforme, —

par voie irréversible bien entendu, comme dans toute transformation réelle, en thermodynamique classique. L'entropie en effet tend vers un *maximum*, donc vers un terme où le système ne se transformera plus.

Si l'on part des fonctions d'Helmholtz ou de Gibbs, l'énergie libre, l'énergie utile, celle qui se peut transformer en travail mécanique, va toujours en diminuant, à mesure que l'entropie augmente.

Comment rendre compte de ces effets *certains*, dans l'expérience réelle, d'après la thermodynamique classique, lorsque nous les transposons en théorie cinétique ? (Cette transposition nous apparaît maintenant comme nécessaire, dans toute expérience, qui veut atteindre l'individualité moléculaire.) Très simplement en transposant aussi la certitude en probabilité.

Reprenons notre image précédente. Pourquoi ne verrons-nous plus revenir notre kilo de poudre noire et notre kilo de poudre blanche, une fois bien mêlés en une poudre grise, à leur état initial de séparation, dans les brassages successifs auxquels nous les soumettrons ? Parce que la distribution entremêlée des grains noirs et blancs est infiniment plus probable que la distribution qui les isolerait en masses distinctes. Le mélange uniforme qui donne cette couleur grise et qui constitue un *équilibre théorique* de tous points analogue à l'équilibre thermique qu'engendre la diffusion de deux masses de gaz primitivement à température différente est un état autour duquel oscillent de très près toutes les distributions que prend notre mélange à chaque brassage : d'autant plus près que le nombre des éléments est plus considérable.

Le calcul des probabilités nous permet d'évaluer d'une façon exacte, précise, et qui plus est, *certaine*, cette plus grande probabilité de l'état moyen uniforme, par rapport à un état plus tranché. Mais ne les numérotons pas comme dans l'expérience faite avec nos six billes tout à l'heure. Ne les numérotons

point, de façon que les grains de même couleur soient interchangeables, comme les molécules de même vitesse dans un gaz.

Prenons seulement 10 grains blancs et 10 grains noirs dans notre poudre. L'aspect gris le plus uniforme nous sera donné une fois sur trois à peu près, l'aspect blanc d'un côté, noir de l'autre une fois sur 184.756 (1). Et les distributions qui se rapprochent le plus de l'aspect le plus uniforme sont, elles aussi, beaucoup plus nombreuses que les autres et se serrent autour de la distribution la plus uniforme. Le ton le plus uniforme après le ton absolument uniforme se présente 1 fois sur 4 ; le ton suivant, plus tacheté, 1 fois sur 14, le suivant, très tacheté, 1 fois sur 100 seulement. Nous arrivons ensuite à une distribution où les deux couleurs sont presque séparées, 1 fois sur 2.000, et enfin à la séparation complète, 1 fois sur 184.756.

On voit qu'avec 20 grains seulement, l'expérience nous présente presque toujours un aspect voisin du gris uniforme et plus souvent celui-ci. Remplaçons nos 20 grains colorés par 20 molécules d'un gaz distribuées en deux groupes : dans le premier, les molécules ont une vitesse moyenne moitié moindre que dans le second : ce qui fait que les températures sont comme 1 à 2. Faisons le mélange. La température uniforme d'équilibre thermique statistique se présentera donc à peu près constamment dans les mesures que nous effectuerons.

Que dire alors, si au lieu de 20 molécules, nous avons 27 milliards de milliards de molécules par centimètre cube, dans les gaz sur lesquels nous expérimentons, aux conditions normales !

Songeons qu'en passant des 6 éléments de notre expérience de tout à l'heure, aux 20 éléments de la

(1) Cet exemple, sous une forme un peu différente, a été donné par Guye, *L'évolution physico-chimique*, p. 38 sq.

seconde expérience, nous sommes passés comme combinaisons possibles de 6 ! = 720 à 20 ! = 2432902008176640000, soit $2{,}4 \times 10^{18}$.

Ainsi, dire, dans le cas de la diffusion des gaz, que la transformation est irréversible, c'est dire qu'il est *hautement improbable* que le système puisse revenir à l'état initial. Et toute transformation irréversible peut se concevoir sur ce type. Non seulement elle le peut, mais encore elle le doit, si nous acceptons la théorie cinétique, c'est-à-dire la constitution moléculaire des corps, la structure atomique.

Cette improbabilité est telle qu'elle devient pratiquement une impossibilité pleine, dès que le nombre des molécules atteint une certaine grandeur. Cette grandeur est dépassée dans *toutes* les expériences qui nous sont perceptibles, dans toutes nos sensations, sauf lorsque nous armons nos sens d'instruments qui nous permettent d'atteindre l'extrême limite de la visibilité artificielle, comme dans le mouvement brownien. Toutes les transformations réelles, c'est-à-dire qui affectent nos sens, doivent donc bien nous apparaître comme irréversibles.

Dire que l'entropie s'accroît toujours et tend vers un maximum dans toutes ces transformations réelles, puisqu'elles sont irréversibles, c'est affirmer une conclusion que M. de La Palisse aurait pu formuler lui-même. A savoir : de toutes les transformations imaginables, se réalise toujours celle qui est la plus probable, étant donné l'état initial. Cet état initial est tel, dans tous les systèmes réels que le nombre des éléments moléculaires que comporte le système est énorme. Si bien que la probabilité de l'état vers lequel il évolue alors fatalement ne permet même pas d'imaginer la chance exceptionnelle qui pourrait arrêter ou dévier cette évolution fatale.

L'entropie est donc liée à la probabilité. Elle est fonction de la probabilité. Le système évolue toujours

vers les états les plus probables. Mathématiquement, cette fonction a une expression précise. C'est Planck qui l'a déduite : l'entropie est égale au logarithme de la probabilité, plus une constante arbitraire introduite par l'intégration (comme dans la somme de l'énergie totale d'un système). Comme dans celle-ci la théorie de la relativité, un principe nouveau, le principe de Nernst, permet maintenant d'éliminer l'arbitraire. Intuitivement l'entropie exprime non seulement le fait de l'évolution, mais cet autre fait lié au premier et qui ne fait qu'un avec lui, la réalisation de l'évolution dans un sens qui l'emporte immensément en probabilité sur tous les autres sens possibles, et si l'on peut dire, la réalisation « du possible le plus possible ».

La nature suit en quelque sorte un principe de moindre effort généralisé. Elle va dans le sens des combinaisons les plus probables, donc de celles qui se présentent le plus souvent et le plus facilement. Mais cette image est trop anthropomorphique, dans une interprétation qui, comme nous le conclurons, essaye d'écarter tout anthropomorphisme et y réussit. La marche vers la probabilité maxima est en effet l'expression même du déterminisme aveugle. L'accroissement de l'entropie ne peut, en dernière analyse, signifier rien autre que la réalisation de l'état dont la causalité est, elle aussi, maxima, l'état vers lequel convergent toutes les causes données dans le système, de même que la constance du taux de mortalité dans une société donnée.

La tendance de l'entropie vers un maximum, c'est la réalisation du plus probable. Faut-il ajouter que ce « plus probable », moyenne de distributions sans nombre qui se serrent infiniment près de la moyenne théorique, atteint, dans la réalité, une proportion fantastique, inimaginable. Aussi l'expérience ne nous montre-t-elle jamais que lui.

II

Dégradation de l'énergie et désordre.

La théorie cinétique a rendu compte du principe de Carnot, de l'irréversibilité, de l'entropie, et de toutes les formules par lesquelles on exprime le principe ou on le lie à ces deux autres notions. Elle les a interprétées en transposant simplement des affirmations absolues, en affirmations *relatives*, des énoncés de *certitudes* en énoncés de *probabilités*. Relatif ici signifie : sous réserve de cas exceptionnels qui sont atteints lorsque l'individualité moléculaire se fait sentir et n'est plus compensée par le très grand nombre.

Reste pourtant encore un groupe de formules, le plus anthropomorphique de tous : celui dans lequel estimant, comme il est vrai de nos machines et à notre point de vue, que le travail mécanique fourni par un système mérite d'être considéré à part et d'une façon privilégiée, on considère la capacité de travail mécanique de ce système. C'est la valeur de l'énergie libre, de l'énergie compensée, de l'énergie utile d'un système, ou encore le rendement d'un cycle. Certes, cette notion, comme toutes les notions scientifiques, a déjà été fortement abstraite. Elle est très loin de la valeur, purement anthropomorphique celle-là, qui représente l'énergie *utilisable* pour nous, et non plus utile, au sens abstrait du mot, le rendement économique d'une machine, lequel est toujours inférieur, et en général, bien inférieur, à l'énergie *utile*. « Utile » signifie abstraitement : qui est capable de produire spontanément de nouvelles transformations réelles. Mais enfin cette notion représente bien une qualité, un caractère privilégié d'une certaine quantité d'énergie et sous certaines formes, par rapport au reste des énergies d'un système. C'est ce qu'exprime l'idée de la dégradation de l'énergie. Comme on l'a vu, cette idée peut fournir de nouvelles

formules du principe de Carnot : formules exactes dans la réalité sensible et sur lesquelles repose une bonne partie des développements de la thermodynamique.

Comment les interpréter en théorie cinétique ?

Cherchons ce qui distingue l'état initial des systèmes, que nous avons considérés à titre d'exemple, de l'état final. C'est évidemment un certain tri dans les mouvements des molécules, symbolisé par le même tri dans les couleurs des grains ou des billes de nos illustrations, symbolisé plus intuitivement encore par un ordre de numérotage dans l'exemple des six billes. Dans l'état final, il n'y a plus de différenciation, il y a nivellement : couleur grise uniforme, température égale. Dans l'état initial, il y a au contraire différenciation ou dénivellation : couleurs noire et blanche, température plus haute et température plus basse.

Là où il y a indifférenciation, et nivellement, il y a aussi homogénéité, uniformité, symétrie et équilibre.

Mais quelle est la raison profonde de ces oppositions, si nous nous mettons sur le terrain de la théorie cinétique ? L'exemple des billes numérotées nous en fournit, de façon intuitive, la réponse. Dans l'état initial il y a un *ordre déterminé*. Dans l'état final cet ordre n'existe plus. Dans toute transformation irréversible, il y a une direction, puisque toute transformation irréversible va d'un état initial à un état final, sans retour spontané possible. Les mouvements y sont donc *ordonnés* vers un but. Dans l'état final au moment de l'équilibre, de l'uniformité, du nivellement, il *n'y a plus de but* aux mouvements. Toutes les directions sont compensées, symétriques par rapport à un repère arbitrairement choisi. C'est le chaos moléculaire du gaz en équilibre.

Deux masses d'un gaz à des températures différentes nous présentent un ordonnancement dans les

mouvements moléculaires : ceux de l'une ont une vitesse moyenne plus grande que ceux de l'autre. Cet ordonnancement est supprimé par la diffusion des deux masses l'une dans l'autre. Il est remplacé par un chaos moléculaire uniforme.

Dans toute transformation irréversible, dans toute augmentation d'entropie, en dernière analyse on trouve qu'un mouvement *désordonné* a remplacé un mouvement *ordonné*. La généralisation peut s'effectuer de façon entièrement légitime.

Or, toute forme ordonnée du mouvement est en définitive un travail mécanique, possible, puisqu'un travail mécanique, c'est un mouvement *dirigé* (1). Mais une forme parfaitement désordonnée du mouvement ne peut plus engendrer de travail mécanique, dans l'ensemble, parce qu'il n'y a plus de direction privilégiée. Tout se compense.

III

Chaleur et mouvement désordonné.

La chaleur produit du travail mécanique, uniquement s'il y a chute de température (forme primitive du principe de Carnot). C'est qu'ici on impose au mouvement désordonné qui, en dernière analyse, constitue la source chaude, une direction privilégiée. Ces mouvements se ralentissent tous. A leur désordre parfait, chaotique, se superpose une direction bien définie : les mouvements se ralentissent tous en perdant de leur énergie cinétique qui se retrouve dans le travail mécanique fourni. Tant que cette organisation (ce ralentissement d'ensemble) se superposera à la désorganisation pure et simple, il y aura production de travail mécanique. Une fois cette organisation supprimée, et l'énergie calorifique à une température

(1) Déplacement du point d'application de la force, sans la direction de cette force, multiplié par la force elle-même.

constante, il n'y a plus production de travail : le mouvement est de nouveau entièrement désordonné et chaotique.

La chaleur est donc simplement de l'énergie mécanique sous forme chaotique, un mouvement désordonné. Et c'est ce désordre qu'on exprime en disant qu'elle est une forme dégradée de l'énergie. Parce que ce désordre est inutilisable. Nous ne savons utiliser l'énergie qu'en ordonnant, en dirigeant le mouvement.

« C'est notre incapacité à coordonner le mouvement moléculaire qui rend presque inutilisable pour nous la prodigieuse quantité d'énergie mécanique qu'il représente (1) ».

La théorie cinétique nous permet donc à la fois de comprendre et la réalité de la dégradation de l'énergie et la part d'anthropomorphisme qui conserve l'expression. Mais elle nous permet de comprendre aussi l'abstraction qui tend à éliminer cet anthropomorphisme. La nature, du moins dans toutes les expériences *réellement sensibles*, tend en même temps que vers l'équilibre, le nivellement, l'uniformité thermiques, et pour la même raison, vers les complexions les moins ordonnées de mouvements, vers le chaos moléculaire parfait.

L'énergie se dissipe (selon la formule de Rankine) parce que le mouvement se désordonne.

L'énergie utile ou libre, ou compensée (par du travail mécanique), est toujours liée, en dernière analyse, à une organisation du mouvement, à une direction d'ensemble, plus généralement à une attitude d'ensemble du mouvement. Un peuple n'est capable d'agir en tant que peuple, que lorsque les individus qui le constituent sont entraînés dans une direction d'ensemble qui se superpose aux directions individuelles. Cette direction d'ensemble c'est sa trace historique.

(1) Guye, *L'évolution physico-chimique*, p. 70.

De même un système chimique n'évolue qu'autant qu'il est susceptible d'une direction d'ensemble de ses mouvements moléculaires, superposée à leurs mouvements purement individuels.

Et dans les systèmes physico-chimiques, isolés et à notre échelle sensible, la possibilité spontanée d'une évolution, c'est-à-dire d'une tendance d'ensemble (sans cette tendance il n'y a plus évolution, mais équilibre statistique), diminue au fur et à mesure des transformations qu'elle permet. L'entropie y tend vers le maximum de désordre, vers le chaos ou l'anarchie individualiste. Nous comprenons maintenant la raison profonde de la vérité que la thermodynamique avait empruntée à M. de la Palisse, et qui résume au fond toute la théorie de l'entropie : « A mesure qu'un système évolue, il lui reste moins à évoluer » « A mesure qu'un système dure (au sens bergsonien) il lui reste moins à durer ». C'est évident, à moins que le système ne soit éternel. Et à l'explication thermodynamique du fait, la théorie cinétique va ajouter cette correction. « Mais il est éternel. »

La possibilité de son évolution diminue, à moins que l'évolution ne le ramène à son état initial : phénix qui renaît de ses cendres.

Voici un système constitué par une enclume et un marteau à un mètre au-dessus de l'enclume. Les mouvements désordonnés des molécules qui constituent le marteau (ici des oscillations étroites autour de la position moyenne de chacune des molécules, puisque nous avons affaire à un solide) sont improductifs de travail mécanique. Ils déterminent simplement par leur vitesse moyenne la température du marteau. Le marteau tombe sur l'enclume, fournissant un travail mécanique appréciable. Aux mouvements désordonnés des molécules s'est superposé un mouvement d'ensemble de toutes ces molécules, mouvement bien ordonné, de haut en bas, sous l'effet

de la pesanteur. Après le choc, plus d'énergie cinétique. Celle-ci puisqu'elle n'a pas été employée à autre chose, s'est entièrement dégradée en une augmentation de température. Augmentation de température, c'est-à-dire accroissement de vitesse des mouvements désordonnés des molécules de l'enclume et du marteau. Dégradation de l'énergie cinétique en énergie calorifique. Pourquoi dégradation ?

Est-ce que nous ne pourrions pas employer cet accroissement général de vitesse à restituer le travail mécanique qu'il représente ?

Si nous disposons d'un corps à température plus basse que notre système enclume-marteau et d'un dispositif, d'une machine appropriée, nous pourrions récupérer du travail mécanique, en abaissant la température du système, jusqu'à sa température primitive. Ce serait une très faible partie du travail mécanique dû à la chute du marteau, d'autant plus grande que notre machine serait plus parfaite, et la température de la source froide plus basse. Mais ce faisant, nous voyons que nous réimprimerions à nos molécules un mouvement (négatif) *d'ensemble*, qui ralentirait toutes leurs vitesses de la quantité dont la chute du marteau les avait précisément accrues : nous superposerions un comportement d'ensemble (ralentissement global) aux comportements désordonnés de nos molécules. Un ordre relatif surajouté au désordre foncier, voilà quelle serait la cause de cette régénération d'énergie mécanique. Remarquons entre parenthèses que, après cette récupération, si le désordre moléculaire est le même qu'avant, puisque le nombre des molécules n'a pas varié, la possibilité de leur imprimer un mouvement d'ensemble, sans faire appel à des sources de forces auxiliaires et extérieures, a diminué, puisque la température du système est plus basse, et que les températures ont une limite. L'entropie n'a pas cessé d'augmenter, si nous tenons compte de la distance du marteau à

l'enclume et de la gravitation, depuis le début de nos expériences.

Et tout cela est entièrement conforme aux enseignements de la thermodynamique classique.

Mais voici que nous allons arriver à quelque chose de nouveau et qui n'est plus *entièrement* conforme à cette thermodynamique.

Il y a un second moyen de récupérer l'énergie cinétique de notre système, qu'a dégradée en la transformant en énergie calorifique notre première expérience.

C'est de faire reprendre, en sens inverse, à toutes nos molécules les mouvements ordonnés que la chute du marteau avait superposés au désordre de leurs allées et venues individuelles. Nous avons alors là, théoriquement, une modification qui restitue le système dans son état initial.

Est-ce possible ? La thermodynamique dit *non*. La théorie cinétique répond : *Peut-être*. Et si nous disposons du temps : *sûrement*.

La théorie thermodynamique affirme des certitudes, de l'absolu. La théorie cinétique n'atteint que des probabilités. Et parce que les certitudes absolues de la première ne sont plus que des probabilités, si grandes qu'elles soient, l'improbable reste nécessairement possible. L'improbable doit nécessairement se réaliser, si rarement que ce soit. Sans cela il ne serait pas l'improbable, mais l'impossible. Impossible c'est précisément ce que la théorie cinétique interdit d'une façon absolue qu'il soit. Son impossibilité serait en contradiction formelle avec les prémisses, avec l'expérience qui les fonde.

Le « peut-être » (en son sens plein) de la théorie cinétique, voilà la différence des deux systèmes. Différence presque nulle pour la physique. Considérable pour sa philosophie.

Pour la physique, la différence est presque nulle, parce que c'est un *peut-être* dont nous avons vu l'infime

chance de réalisation pour un système aussi complexe que celui de notre enclume et de notre marteau. C'est un *peut-être* de style, un impossible dans la réalité. Mais, ce qui nous intéresse pour le moment, c'est ce que ce peut-être, si jamais il pouvait être réalisé, ne le serait qu'en superposant au désordre un nouvel ordonnancement d'ensemble exactement inverse du premier, lors de la chute du marteau sur l'enclume. Alors on verrait le marteau remonter à un mètre de haut au-dessus de l'enclume, en se refroidissant, ainsi que l'enclume, à leur température initiale. On verrait cela, peut-être, si l'on vivait en années le nombre inimaginable $10^{10^{10}}$ que nous avons déjà cité.

Mais avec le mouvement brownien nous voyons, pour des masses à la vérité bien plus petite que notre marteau et des hauteurs bien plus petites qu'un mètre, le phénomène se produire sous l'objectif de l'ultramicroscope.

IV

La réalisation nécessaire de l'improbable : les fluctuations.

Or, ce qui se passe pour le mouvement brownien doit se passer aussi, et *nécessairement*, dans les systèmes plus complexes. Seulement l'effet en est absolument insensible. Quand nous parlons d'équilibre, d'uniformité, de nivellement, la théorie cinétique nous contraint de poser sous ces apparences — d'une exactitude absolue à notre échelle — une simple moyenne statistique, résultat de compensations sans nombre. Mais les différences individuelles, si elles sont masquées par la loi des grands nombres et les compensations qui en résultent, n'en subsistent pas moins. Ceci est *indubitable*. Une moyenne n'est qu'un à peu près. Une statistique n'est jamais exacte qu'à un pourcentage près. Ce pourcentage a beau se réduire dans des proportions qui tendent à l'annuler, lorsque

le nombre des individus sur lequel porte la statistique croît indéfiniment, il n'est jamais égal à 0. Au jeu de la rouge et de la noire, après 2 milliards de milliards de coups, l'excédent d'une couleur sur l'autre est devenu proportionnellement infime. Le pourcentage de l'écart est de l'ordre du milliardième de milliardième. Mais il n'en reste pas moins vrai que si l'on arrête le jeu, à ce moment précis, il y aura, la plupart du temps, un milliard de milliards de sorties de la noire, plus ou moins une ou quelques unités, et inversement un milliard de milliards de sorties de la blanche *moins ou plus* une ou quelques unités. Il y a donc toujours une *fluctuation*, autour de la moyenne mathématique précise, et puisque c'est une moyenne, un *écart* avec cette moyenne.

Incontestablement donc dans le système marteau-enclume, il doit y avoir, au delà de toute limite relativement à la perception sensible, des fluctuations d'équilibre, d'infimes oscillations de la distance marteau-enclume, qui constamment violent, en toute précision, et le principe de Carnot, et le théorème de l'accroissement constant d'entropie. Encore une fois, ceci ne saurait intervenir pratiquement *en aucune façon*, dans l'application des lois physiques, ni dans leur utilisation technique. Mais, philosophiquement, nous voulons en ce moment dire par là : sur le terrain de la science pure, de la connaissance pure, du θέωρειν aristotélicien, ces petits écarts ont *autant* d'importance que des écarts plus considérables. Et nous devons les retenir.

Les fluctuations sont un phénomène universel, et nécessaire, pour la théorie cinétique, c'est-à-dire pour la physique théorique contemporaine.

L'expérience malgré les différences d'échelle nous les révèle partout où les circonstances s'y prêtent.

L'indice d'un effet statistique possible se rencontre dans l'expression mathématique des lois phy-

siques toutes les fois que celles-ci sont figurées par une fonction exponentielle négative (de la forme $y = C\,e^{-kx}$). En elles, est comme imprimée la marque du hasard, plus exactement de la possibilité du hasard ; car les courbes en cloche, qui figurent cette fonction, peuvent représenter d'autres choses encore, mais en particulier elles représentent les probabilités dépendantes du hasard. Elles nous en suggèrent l'application. Dans le cas de mélange des poudres l'exponentielle négative est de la forme $y = Ce^{-k^2x^2}$. Elle se représente géométriquement par une courbe en cloche symétrique par rapport à un axe parallèle à l'ordonnée et qui représente la distribution la plus probable. A gauche et à droite, les distributions se serrent d'abord très près de celle-là, dans la partie supérieure de la cloche. Elles représentent des distributions de probabilité inférieure, mais assez voisines de la distribution la plus probable. Puis la courbe s'abaisse très vite des deux côtés : elle représente alors des distributions de moins en moins probables, de plus en plus rares, puisque la hauteur de l'ordonnée au-dessus de l'abcisse correspond à la fréquence d'une distribution par rapport à toutes les distributions possibles.

C'est la courbe représentative des erreurs d'expérience dues au hasard, d'après la loi de Gauss. Ces erreurs sont bien les fluctuations, les écarts d'appréciation (dans la lecture d'une mesure, par exemple) qui se distribuent symétriquement autour de la vérité exacte. Nos instruments et nos sens, en effet, sont imparfaits. Les circonstances qui influent d'une manière extrêmement minime sur l'expérience sont nombreuses (si elles ne sont pas liées au phénomène en observation, mais, dans ce cas, elles sont systématiques et doivent être retenues et non éliminées). Elles influent tantôt en un sens, tantôt en un autre. Par suite de leur grand nombre il y a compensation. La représentation d'une loi physique sous cette forme

peut donc être l'indice que nous n'avons pas affaire à un effet unique, ou à des effets peu nombreux et isolément perceptibles ; mais à une multitude d'effets entrecroisés dont nous n'observons que les résultantes, bref à une *loi statistique*.

Or, les phénomènes physiques, ou plutôt les grandes classes de phénomènes physiques dont les lois d'ensemble font intervenir cette représentation analytique et géométrique sont nombreux. Et plus encore que par le nombre, ils s'imposent à l'attention philosophique par la qualité. Ce sont toutes les classes de phénomènes où il faut, si nous voulons les comprendre,soit faire sa part à l'individualité moléculaire, soit à ce qui résulte directement de sa considération. Il y a là une convergence remarquable. Elle peut être considérée comme un des fondements expérimentaux de la théorie cinétique.

En réalité toute expérience qui vient à l'appui de l'hypothèse atomistique peut être considérée comme venant à l'appui de la théorie cinétique. La théorie cinétique n'est que la mécanique moléculaire. Son champ s'étend à partir de l'atome considéré comme un tout (elle exclut donc la mécanique intra-atomique et les vitesses beaucoup plus grandes que les vitesses moléculaires) jusqu'aux complexes moléculaires où l'individualité de la molécule n'est plus sensible, c'est-à-dire jusqu'à ces ensembles qui constituent les corps à l'échelle sensible. D'une façon plus topique : jusqu'au domaine d'application de la thermodynamique classique.

Par suite tout ce qui touche à la théorie moléculaire, tout essai de preuve apportée à la réalité des molécules, tout cela est essai de preuve apportée au postulat, au principe de la théorie cinétique des gaz : la structure moléculaire de la matière se manifestant de la façon la plus simple à l'état gazeux.

De toutes ces preuves d'ordre expérimental nous n'avons à retenir ici que les confirmations qui se

rencontrent précisément au moment où sous les lois de grand nombre, commence à se faire sentir l'individualité moléculaire : les faits de fluctuations, les écarts par rapport à la moyenne théorique, conséquence analytique des très grands nombres.

Le mouvement brownien en est l'exemple le plus suggestif, celui qui, historiquement, a donné le branle à l'interprétation des fluctuations expérimentales. Et nous avons vu qu'il pouvait et devait rationnellement être généralisé au delà des limites de l'expérience. Cette généralisation rationnelle reste évidemment hypothétique.

Mais, à côté du mouvement brownien, d'autres faits expérimentaux nous invitent à généraliser, à universaliser — en accordant la déduction hypothétique et rationnelle avec la constatation des faits — la théorie des fluctuations, ou, si l'on veut, la théorie des écarts entre la réalité et le principe de Carnot.

Il est d'intuition, dans la théorie moléculaire des fluides, que si l'équilibre apparent de ce fluide cache une agitation incessante, l'uniformité de la densité du fluide, de même que son incompressibilité, doivent n'être elles aussi qu'une densité statistique, une moyenne. En certains points doivent constamment se produire des concentrations, avec augmentation de pression, compensées en d'autres points par des raréfications avec une pression diminuée. Ces différenciations ne peuvent se produire que dans des parties si petites du fluide, qu'elles échappent, aux conditions normales, à tout moyen d'investigation. Il faudrait pouvoir observer des éléments de volumes ne contenant qu'un petit nombre de molécules. Et l'on verrait à chaque instant ce nombre varier, au lieu de rester fixe, comme l'exige la théorie des expériences à notre échelle. Il faudrait que les molécules fussent visibles. Nous savons qu'on en reste bien loin, même avec l'ultramicroscope. D'ailleurs avec les vitesses des molécules, l'observation serait malaisée.

Comme le dit Guye (1) « c'est donc dans la plupart des cas la petitesse de l'espace ou du temps dans lequel il conviendrait d'observer les fluctuations qui les rend inaccessibles à l'expérience ».

Mais dans certaines conditions anormales le phénomène peut être rendu sensible : par exemple dans l'opalescence critique des liquides. Les liquides sont à peu près incompressibles ; les gaz, les vapeurs, sont au contraire compressibles presque indéfiniment. D'autre part une vapeur ne peut se condenser en liquide qu'à partir d'une pression et d'une température déterminées (qu'on appelle pression et température critiques), pression et température qui varient en raison inverse l'un de l'autre. Le point critique est un point où la pression et la température sont telles que le liquide se vaporise, et la vapeur se liquéfie. C'est le moment d'équilibre instable qui sépare, en des conditions déterminées, les deux états et forme comme leur commune limite. Un liquide qui arrive à cet état perd son incompressibilité, puisqu'il est aussi bien en quelque sorte vapeur. Son coefficient de compressibilité tend à devenir infini puisqu'il tend à se transformer en gaz. La moindre variation accidentelle de pression produira donc en un point du fluide une variation très forte de densité. « Au lieu d'avoir un milieu de densité homogène, nous aurons donc comme la juxtaposition d'un très grand nombre d'éléments de densité différente plus forte ou plus faible, que celle qui correspond à l'équilibre ; et ces éléments de densité différente se comporteront vis-à-vis de la lumière incidente comme les particules en suspension d'une solution trouble ; d'où le phénomène d'opalescence » (2). Comme toute solution trouble qui est formée par des particules en suspension avec des différences de densité, des différences de structure, innom-

(1) *L'évolution physico-chimique*, p. 60.
(2) Guye, *Id.*, p. 59.

brables, qui en font un vrai milieu discontinu, il diffractera à la lumière. Et cette diffraction est l'image *visible*, *sensible* d'une discontinuité et d'une différenciation foncières. Une lumière plus ou moins bleuâtre est déviée latéralement vers notre œil qui la perçoit. L'expérience nous révèle que cette lumière est polarisée. Tous faits qui se produisent aussi bien dans l'opalescence critique que dans l'opalescence d'une solution trouble. Nous ne pouvons décrire ici que qualitativement le phénomène. Mais en partant des données de la théorie cinétique, le calcul permet de retrouver, d'une façon satisfaisante, toutes les modalités de l'expérience, en particulier l'intensité de la lumière diffusée.

La théorie d'Einstein, confirmant les vues et la formule empirique de Lord Rayleigh, attribue également à des fluctuations de densité dans les hautes altitudes le bleu du ciel. Ce n'est pas en effet les poussières qui créent le milieu trouble dont on pouvait tirer raison de cette couleur. Quelle que soit l'altitude d'où se fait l'observation c'est-à-dire quelle que soit la diminution des pressions dans l'atmosphère, l'intensité reste la même ou même au contraire s'accroît légèrement. Il ne peut donc y avoir là qu'un phénomène du genre de l'opalescence critique, une diffraction de la lumière par les molécules, la densité moléculaire devenant très variable pour de très petits volumes dans les couches ultrararéfiées de l'atmosphère. Le volume de l'ordre d'un cube des longueurs d'onde visibles au lieu d'y contenir un nombre de molécules de l'ordre du milliard, n'y contiennent plus que quelques molécules. La densité moléculaire, au lieu d'y garder une moyenne à peu près stable, y varie à chaque instant puisqu'elle n'est faite que de quelques individualités moléculaires. Là encore la concordance des prévisions auxquelles conduit le calcul et des mesures expérimentales est si remarquable, que le bleu du ciel peut être considéré comme

un des faits les plus concluants en faveur de la théorie des fluctuations.

Il en est de même de la dissociation des molécules des vapeurs aux hautes températures. Une constatation expérimentale permet de fixer pour une pression et une température déterminées un degré ou pourcentage de dissociation. Traduit en langage cinétique, ce pourcentage signifie que sur 100 molécules, il y a un nombre fixe de molécules dissociées en leurs éléments atomiques. Ce nombre établit une proportion entre celui des atomes qui, à chaque instant, se recombinent en molécules et celui des molécules qui, à chaque instant, se dissocient en atomes. « Mais cet équilibre n'est pas invariable ; c'est un équilibre mobile caractérisé par le fait qu'à chaque instant, il y a *à peu près* autant de molécules qui se dissocient et deviennent monoatomiques que de molécules... dissociées qui se recombinent. Le degré de dissociation varie donc à chaque instant par suite de cet « à peu près », et ce sont ces oscillations autour de la valeur la plus probable qui constituent les fluctuations de dissociation pour l'état d'équilibre considéré (1) ».

« Mais cette notion de fluctuations peut être étendue et généralisée à bien d'autres grandeurs : fluctuations de température, fluctuations dans l'équipartition de l'énergie, fluctuations de vitesses moléculaires, fluctuations dans l'orientation paramagnétique des molécules d'un gaz, fluctuations dans la composition chimique, etc., etc. (2) ».

A tout cela, il faut encore vraisemblablement ajouter le domaine intra-atomique que nous révèlent peu à peu les phénomènes qui dépendent de la radioactivité. La loi de désactivation des substances radioactives est représentée, elle aussi, par une exponentielle négative. L'atome est lui-même un complexe.

(1) Guye, *Id.*, p. 61.
(2) Guye, *Id.*, p. 60.

L'application des calculs statistiques y serait alors justifiée, soit que le nombre des éléments de ce complexe fût considérable, soit — ce qui est infiniment plus probable, — que les atomes constituassent, grâce à leur grand nombre dans toute observation à notre échelle, tous les moments possibles de leur évolution, *à peu près* dans la même proportion les uns par rapport aux autres.

Ainsi le fait des fluctuations est bien près de s'étendre actuellement à tout le champ de la physique. Et, avec ces fluctuations, c'est la généralisation progressive du principe cinétique, de la mécanique statistique et de la structure discontinue de la matière, jusqu'à des proportions, par rapport à nous, infimes. « L'étude même des fluctuations et de leurs conséquences est... venue donner à ces conceptions théoriques *une réalité pour ainsi dire expérimentale* (1) ».

(1) Guye, *Id.*, p. 79. Les derniers mots soulignés par nous.

TROISIÈME PARTIE

ÉPILOGUE :
A LA SUITE DE LA PHYSIQUE CINÉTISTE

CHAPITRE PREMIER

MÉTAPHYSIQUE DU RETOUR ÉTERNEL

I. — Rétrospective.
II. — Les idées qui mènent la science.
III. — Le retour éternel est-il un artifice *a priori* de l'esprit ?
IV. — Le retour éternel et le principe d'identité.
V. — La confusion originaire du subjectif et de l'objectif.
VI. — La notion d'objet et le retour éternel.
VII. — Le rejet du subjectif et le retour éternel.
VIII. — L'objet doit se suffire à lui-même.
IX. — Réalisme de l'hypothèse.

> « Ombres des temps passés qui sembliez évanouies pour toujours dans la brume des âges et que la baguette magique de la Science évoque à son gré, n'espérez pas le repos, vous êtes immortelles. »
>
> (Dr G. Le Bon : *L'homme et les Sociétés*, t. II, p. 420.)

I

Rétrospective.

D'une façon aussi objective que possible, en procé-

dant simplement en historien, sans idée préconçue, ni thèse philosophique *a priori*, comme nous le voulions, nous croyons qu'on peut résumer ainsi l'histoire de la physique moderne. Le mécanisme sous les formes les plus variées s'est d'abord efforcé de représenter l'univers matériel comme une machine. Ce qui définit une machine c'est un fonctionnement cyclique, périodique, un fonctionnement tel que le système puisse repasser périodiquement par les mêmes états. Une machine évidemment doit pouvoir servir plusieurs fois de façon identique. Il faut qu'il y ait balancement des divers mouvements du système, compensation, et finalement conservation de ce mouvement. Le levier, la balance sont des exemples expressifs d'un système de ce genre. Le système solaire conçu comme le concevaient Newton puis Laplace en est un autre.

De bonne heure certes, on s'est aperçu que les machines humaines tendaient vers cet idéal, mais ne le réalisaient jamais. Il y a frottement, perte, finalement usure des organes de la machine.

Le mouvement perpétuel est irréalisable par l'homme. Mais la cause en est dans l'imperfection de la machine construite par l'homme, en fin de compte dans l'imperfection de la nature humaine. L'homme imite Dieu, mais il n'est pas Dieu. Or l'Univers sort des mains de Dieu. Ici la machine est parfaite. Sinon elle ne serait pas création divine. Le mouvement perpétuel, qui n'est pas possible pour l'homme, l'est pour Dieu et l'Univers le réalise : non point qu'il soit perpétuel, mais il est construit par la perfection créatrice exactement comme s'il devait l'être (Descartes). Le système solaire est *stable*. L'Univers est un système de mouvements toujours équilibrés, car il est toujours mécaniquement en équilibre. C'est une balance exactement compensatrice (l'idée cartésienne du mouvement tourbillonnaire corollaire de la conservation du mouvement). L'Univers dans son tout est un système à marche cyclique. C'est une machine parfaite.

Quand, au XVIIIe siècle, la physique veut abandonner les dernières idées théologiques, elle n'a qu'à les passer sous silence. L'Univers peut marcher tout seul. Il est machine parfaite. Parmi les idées métaphysiques (nous donnons simplement à ce mot son sens tout entier : qui transcendent l'expérience pure ; les idées par lesquelles les hypothèses, les théories, l'idéal rêvé par le savant, guident son effort et sous-tendent sa science), l'idée cyclique, proclamée par la raison hellénique, et venue sans doute d'un rationalisme plus ancien encore, abandonnée à demi (seulement pour les phénomènes sublunaires) par le moyen âge, restaurée par la Renaissance et la physique du XVIIe siècle, l'idée du « Retour éternel » est une des plus profondes, des moins discutées, et des plus fécondes.

La physique tend donc à s'ordonner, dans tout le XIXe siècle, à l'idée de retour éternel : l'idée directrice de toute réduction mécaniste, — puisqu'aussi bien la mécanique rationnelle, c'est la mécanique de la possibilité du retour éternel.

C'est alors qu'éclata, vraiment comme un coup d'Etat, dans cette république en apparence si bien assise de la science, l'idée que Clausius a tirée des travaux de Sadi-Carnot : le principe de Carnot, et l'inégalité de Clausius dans tout le domaine de l'expérience. L'inégalité signifie qu'il ne peut plus y avoir conservation et balance. Quelque chose oriente l'Univers dans un sens à partir d'un certain état vers un autre état, au moins limite. A chaque pas de cette orientation inéluctable, la puissance de transformation de l'Univers diminue. Il s'achemine vers la mort dans une moyenne de température de plus en plus basse, l'écart diminuant sans cesse entre les températures extrêmes. L'Univers va s'ankyloser peu à peu. Et de cet état il ne pourra absolument plus sortir. La secousse est si profonde qu'on peut bientôt proclamer la déroute de l'ancien mécanisme, la faillite de la science,

si l'on identifie la science à la pensée qui l'a guidée depuis trois siècles. C'est, dans la physique, une crise philosophique (car la philosophie n'est jamais absente de la science). Et cette crise, c'est l'énergétisme.

Mais, l'idée n'est acceptée qu'à regret, à moins qu'on la fasse servir à des fins métaphysiques. Au sein même de l'énergétisme, du début à la fin du triomphe de la doctrine, de Rankine à M. Selme, nous voyons l'hésitation, les retours, les efforts infructueux pour retenir de l'ancienne théorie physique l'idée du retour éternel.

Enfin celle-ci jaillit plus ample, plus profonde, plus vivante que jamais, plus expérimentale aussi, de la théorie cinétique des gaz, et de tout ce qui vient s'y coordonner.

L'inégalité de Clausius n'est vraie qu'à des yeux qui voient gros, en masse. Si l'on entre dans le détail des phénomènes, elle s'évanouit. La création de l'entropie, la tendance à l'uniformité, la caducité des systèmes matériels, tout cela n'est vrai que de systèmes complexes, entre des limites données et assignables. Pour nous, humains certes, celles-ci semblent extraordinairement éloignées. Mais, pour exprimer la vie Universelle, un nombre de siècles, voire de périodes géologiques, écrit au moyen de l'unité suivie de milliards de zéros, ne compte pas plus que la vie d'un éphémère en face de l'infinitude ! Affaire d'échelle.— Les innombrables coups de dés que sont les mouvements des molécules, après avoir fait sortir les combinaisons les plus probables un nombre immense de fois, sont bien obligés, et par la même loi, d'amener, si rares qu'elles soient, une des très improbables combinaisons qui replacent les choses en un état antérieur. Si cela n'était pas, le reste, non plus, ne serait pas. C'est le même destin qui le veut. Le mouvement qui tend toujours à être de plus en plus désordonné, se trouvera coordonné à nouveau pour un nouveau cycle proche des anciens — inéluctablement. De même le 0 doit fatale-

ment sortir un certain nombre de fois à la roulette, et distribuer sa prébende à la cagnotte : la seule éventualité certaine du jeu et la seule qui importe au jeu. D'ailleurs les violations continuelles, mais dans des limites restreintes, du principe de Carnot, les « fluctuations » sont un des faits les plus généraux rencontrés dans la nature maintenant que nous cherchons à les déceler, les combinaisons réalisées par les mouvements des molécules n'étant pas toujours les plus probables, mais celles qui oscillent autour de la plus grande probabilité. Il y a toujours sursaut des systèmes vers « l'un peu moins probable » dans la marche vers « le plus probable ».

Depuis l'essor de la pensée rationnelle et de la pensée scientifique qui n'en est qu'une forme, qu'une application, l'application la plus complète, la plus ample, et la plus heureuse, l'idée de retour éternel nous apparaît comme liée à elle comme pièce, le plus souvent pièce maîtresse, de sa charpente.

Et l'histoire de la physique dans le dernier cinquantenaire du siècle passé nous montre, à l'état aigu, l'importance foncière de l'idée. C'est le principe de Carnot et la fonction de Clausius qui ont joué le grand premier rôle. Tout oscille autour d'eux. La restauration de certains pensers philosophiques, une façon nouvelle de comprendre la science et la signification des lois scientifiques, une nouvelle théorie de la connaissance, une influence profonde sur les systèmes proprement métaphysiques, certaines harmonies lointaines, mais profondes avec la pensée littéraire et artistique, tout cela rejoint d'assez près, à le bien examiner, la mise en échec de l'idée cyclique et de l'esprit mécaniste qui ne fait qu'un avec lui. Nouvelle illustration de la parole de Renan, si vraie et si riche pour qui la comprend : « Ce sont les idées qui mènent le monde ».

Une leçon philosophique peut-elle se dégager de cette histoire ? Ou, si l'on préfère et moins ambitieu-

sement : cette histoire a-t-elle une signification philosophique ? Répondre non, serait vraiment absurde. Alors quelle signification ?

II

Les idées qui mènent la science.

Descartes a eu raison : la pensée scientifique, l'esprit scientifique sont uns. Il y a des sciences, mais il y a, les englobant légitimement toutes, la science. L'objet,les méthodes, les procédés de méthode surtout diffèrent d'une science à l'autre. L'esprit même d'une science, si l'on entend par là les manières d'être intellectuelles qu'il y faut, diffère de l'esprit d'une autre science, comme l'esprit d'un savant diffère de l'esprit d'un autre savant. Mais au-dessus, ou au-dessous de toutes ces diversités — nécessaires et fécondes — il y a une même pensée, un même idéal — très large d'ailleurs — qui se laisse apercevoir assez bien chez tous les savants et dans toutes les sciences. Cette pensée, c'est le contenu réel et vivant qui se cache sous ce mot : la science. Si bien qu'à analyser de près une science, surtout une science centrale comme la physique, et déjà si poussée, on peut, avec précautions, conclure de façon assez générale.

Il semble, à étudier de près ce contenu, que les idées qui ont mené très fréquemment le développement de la science peuvent se classer *grosso modo* en trois groupes.

Il y a les idées transitoires, celles qui paraissent à un moment donné, puis dont on ne parle — sinon dans l'érudition — guère plus après qu'avant la période où elles ont joué leur rôle. Il y a, par contre, celles qu'on retrouve toujours et partout : le gros œuvre de la charpente : l'idée d'objet, de matière, de loi, d'invariance, d'identité, d'analogie, de conservation, de similitude, d'action, de la possibilité de

la déduction, etc. Ces idées maîtresses ont d'ailleurs une histoire riche de détails, et où leur sens a évolué, sans cependant qu'il y ait jamais eu discontinuité dans leur fond et leur rôle.

Les premières caractérisent une période : elles s'apparentent souvent à d'autres idées, à un état d'esprit qu'on retrouve ailleurs et un peu partout dans l'époque : les qualités occultes de la scolastique, par exemple, qui ne sont point exactement les essences aristotéliciennes, bien qu'elles en dérivent, — mais dans une pensée qui est hantée par l'eucharistie ; et plus tard certaines qualités occultes surtout le phlogistique, le calorique, « l'acedum pingue », ailleurs les tourbillons, les esprit animaux, etc. La liste pourrait s'allonger sans cesse. Ces concepts ont joué souvent un rôle prépondérant dans la courte période qu'ils ont illustrée. Puis après ils ont disparu. Ils ont été remplacés par d'autres. Ou bien ils se sont modifiés de telle façon qu'ils se sont anéantis eux-mêmes pour devenir vraiment, complètement, autres.

Les idées permanentes, voisines au fond des vérités éternelles, des idées innées de la philosophie cartésienne, sont les éléments capitaux que l'histoire des sciences apporte par l'intermédiaire de l'épistémologie, à la théorie de la connaissance et à la métaphysique d'une part, à la psychologie des fonctions intellectuelles supérieures de l'autre. Il s'agit de les déterminer en elles-mêmes, puis dans leurs rapports réciproques et de voir si elles forment un système.

Enfin entre ces deux classes extrêmes et tranchées il en est une intermédiaire. On peut, on doit se demander, d'après l'histoire, si elles font partie de la première ou de la seconde. Ce sont des idées que l'on retrouve toujours et partout, mais avec des fortunes très diverses, tantôt attaquées, repoussées, tantôt considérées comme indiscutables, tantôt en première place, tantôt presque effacées. En général elles vont par couples : thèses et antithèses, ce qui explique leur

effacement alternatif, les critiques ou la confiance qu'elles suggèrent. Ces « idées à éclipses » sont peut-être les plus intéressantes pour l'histoire des idées comme pour le philosophe, le métaphysicien et le psychologue. Elles montrent des besoins, des tendances contraires, des inquiétudes de l'intelligence. Elles font sentir, en plein dynamisme, l'architectonique de notre intelligence, non point de notre intelligence toute faite et arrêtée, si elle l'est jamais, mais de l'intelligence dans sa pénombre, en train de se faire, dans notre lutte contre ce que nous voulons comprendre. Les idées de continu et de discontinu, de plein et de vide, l'idée cinétique et l'idée dynamiste, l'idée d'action au contact et l'idée d'action à distance, de relativité et d'absolu, de fonction et de causalité, en voilà des exemples. Il est de ces couples qui se rapprochent davantage des idées transitoires, d'autres qui tendent vers la permanence ; et ce sont celles dont l'étude est à la fois la plus importante et la plus instructive.

Il est à peine besoin de dire, après ce que nous avons exposé, que l'idée de retour éternel, l'idée cyclique est de celles-là. Elle a son antithèse dans l'idée d'une orientation déterminée de la nature, en somme d'une fin. Toute la question est de savoir si l'intelligence tend à éliminer l'un des termes du couple au profit de l'autre : dans l'espèce, à s'assimiler l'idée de retour éternel comme essentielle à son architectonique de la connaissance.

Il semble que là encore la réponse ne comporte pas d'équivoque. L'histoire de la physique consultée objectivement dans son ensemble, l'histoire de ce fait privilégié pour la question qu'est la crise de la physique dans le dernier cinquantenaire du XIXe siècle, nous imposent à peu près cette conclusion : la pensée scientifique revient toujours à l'idée de retour éternel, comme si elle était un de ses besoins impérieux. Elle tend à l'organiser dans le gros œuvre de sa charpente.

III

Le retour éternel et l'apriorisme.

Pourquoi, et qu'est-ce que cela signifie ?

La première solution qui se présente à l'esprit, et qui est presque une solution paresseuse, c'est que l'esprit doit, d'après ses lois fondamentales, en venir à imposer à l'expérience la loi du retour éternel. C'est au fond une solution kantienne, du genre de celle dont nous trouvons l'application dans les « Premiers principes métaphysiques de la nature ». Au fond des philosophes, partis de points de départ fort différents, aboutissent à des conclusions de ce genre. Sans nous attacher à aucun d'eux plus particulièrement, nous allons nous efforcer de synthétiser leurs tendances, leurs argumentations et leurs conclusions.

L'idée du retour éternel, depuis les spéculations héraclitéennes sur la grande année — et elles remontent bien au delà — s'apparente directement au besoin de comprendre, au besoin d'intelligibilité. Il est d'une grossière théorie de la connaissance de poser en face du sujet un objet qui en est complètement séparé. Sur ce point nous sommes complètement d'accord. La connaissance construit l'objet, non point sans rapports avec une matière qui, par définition, nous échapperait, mais en la modifiant, en l'informant profondément. L'objet que nous posons est alors pétri par l'esprit. Il en porte les marques. Un fait scientifique, plus généralement un fait de connaissance, n'est jamais un « fait brut ». C'est un fait qui ne peut être défini qu'à l'aide des conventions qu'y introduit l'intelligence.

Ces conventions sont de tous ordres, depuis le simple arbitraire de l'hypothèse commode, jusqu'aux besoins impérieux de l'esprit. Hypothèse commode, comme toute l'hypothèse mécaniste dont elle est une des bases essentielles, voilà ce qui apparaît au premier plan dans l'idée cyclique. Un système qui peut, qui

doit repasser autant de fois qu'on le veut par les mêmes états est un système plus général et plus simple qu'un système qui évolue indéfiniment vers une fin particulière. Il présente un maximum de stabilité et garantit aux lois un maximum de certitude. Il assure à l'esprit le maximum de quiétude. Son étude est faite une fois pour toutes, et sa loi est définitive. Il est évident que ce sont là autant de propriétés « commodes » pour la connaissance. Si l'esprit a vraiment pu disposer la matière qui lui était offerte de cette sorte, il a réalisé le maximum d'économie de pensée et de commodité intellectuelle.

Mais il est malaisé de prétendre jusqu'au bout que l'idée de retour éternel soit un artifice commode, le plus commode peut-être entre tant d'autres pour enserrer nos connaissances, pour fabriquer avec les faits qui n'en peuvent mais, qui sont en eux-mêmes indifférents à l'intelligibilité, des objets intelligibles. Certes il est toujours loisible de soutenir ce pragmatisme extrême par une théorie de la connaissance du genre de celle de Bergson. L'intelligence s'élabore et se développe en nous, par les actions que nous sommes conduits à exercer, que nous sommes contraints d'exercer sur le monde extérieur. Pour cela elle découpe et retient dans le réel, dans cette durée si instable et fuyante qu'est le réel, ce qui sert directement à ces actions. Elle appauvrit le réel, dans la mesure où elle néglige les éléments inutiles, voire nuisibles, aux réponses immédiates que nos besoins accrochent à ce qui fuit sans cesse. L'action tend à stabiliser l'instable, à remplacer par l'automatisme (en un sens très large) et la répétition, une création qui sans cesse innove. La raison se construit en fonction de l'action, en élaborant une architectonique de l'intelligence adaptée à ce que nous pouvons retrouver, abstraction faite de sa nouveauté sans cesse continuée, dans la vie universelle. Les systèmes fermés, cycliques sont, comme on voit, des pièces essentielles de la conception

qu'une intelligence rationnelle peut se faire du monde. En construisant à partir du réel, mais d'un réel bien partiel, la « matière » objet de la science, elle doit construire des systèmes qui se ferment comme les tourbillons de Descartes, les attractions et les forces centrales, les courants de Maxwell, les tubes-tourbillons de Lord Kelvin ou de Helmholtz, les nouvelles conceptions de l'atome et du cinétisme. De ce monde « orbitaire » il est manifeste que l'idée de retour éternel est le fondement et la base. Un cycle institue comme un repos dans le mouvement.

Mais une telle métaphysique s'évade du pragmatisme pur immédiatement. D'abord l'idée de retour éternel et de système fermé a ses attaches dans le réel. La matière est au sein même de la vie, si la vie est autre chose. Une existence si pauvre qu'elle soit est quand même une existence. Et puis l'architectonique de l'intelligence n'est plus un simple artifice arbitraire, choisi, entre mille autres, pour sa commodité, et qu'il nous est loisible de modifier et de changer. L'intelligence *est*, elle aussi, avec ses lois propres, puisqu'elle n'est autre chose que l'ensemble de ces lois. Ce mode de connaissance, pour imparfait qu'il soit, est mode de connaissance. Il est adapté à sa pauvre matière. Et il est même impossible à un être qui le possède de le transcender complètement. Il faudra nécessairement qu'il s'exprime, se communique — à lui-même, comme aux autres — à travers ce mode.

IV

Le principe d'identité.

De fil en aiguille nous voilà ramenés, à la genèse près, et aussi à cela près que l'organisation de l'intelligence est dynamique au lieu d'être statique, nous ne disons pas à Kant, mais à une théorie législatrice du donné. Nous ne créons plus l'objet de notre science,

en voulant agir sur le donné, mais nous le plions à certaines lois *a priori*.

Or la loi la plus fondamentale de l'intelligence, c'est bien le principe d'identité. Nous expliquons, nous comprenons les choses, en montrant qu'elles sont impliquées par d'autres choses que nous avons déjà expliquées et comprises.

L'idée de retour éternel ne serait-elle pas une simple conséquence du principe d'identité ? Enfermer tout un processus matériel dans un cycle fermé n'est-ce pas en somme réaliser l'identité successive de tous les états qu'il a traversés, depuis l'état originaire, qu'il finit par retrouver ? Le cycle ce n'est pas seulement la stabilisation de l'instable, c'est encore l'identification du changeant, la réduction du devenir à l'être.

Ici il faut préciser. Le mot identité,malgré son apparence simpliste et sa signification scientifique si précise, est un des mots les plus équivoques du vocabulaire philosophique. Il prête au jeu de mots contre lequel parfois la philosophie n'est pas toujours en garde.

La multitude de sens qu'on a donnée au mot « identité » se classe en deux grands groupes : le sens ontologique et le sens relationnel. Ils n'ont, à bien voir, à peu près aucun rapport, et surtout ils n'ont absolument aucune analogie de rôle. Si nous prenons le sens ontologique, ce qui signifie à la lettre que les diversités, les hétérogénéités sont des apparences tissées sur un fond toujours identique à lui-même, sur de l'homogène pur, il en faudrait conclure que toute explication s'achève dans le néant. Nous sommes à l'opposé de l'Etre de Parménide, car l'Etre de Parménide est plénitude d'être,tandis qu'ici nous avons vidé l'Etre de toute existence. C'est Parménide réduit à l'absurde, par la critique adverse.

Si tout ce que nous disons revient à dire A est A nous ne pouvons rien faire qu'égaler zéro à lui-même.

Evidemment, la construction de la connaissance, la construction de cette connaissance privilégiée qui, au sein de la connaissance ordinaire, en est la perle et le couronnement, la connaissance scientifique, n'a jamais procédé ainsi. Il suffit de songer à ce pourquoi l'esprit a créé le mot connaissance. Connaître c'est savoir quelque chose qui n'était pas su avant. Ce n'est pas aboutir au néant.

On n'a pas de peine d'ailleurs à montrer que même dans « A est A », le second terme est hétérogène au premier, puisqu'il n'est pas considéré, selon le mot heureux d'Aristote, sous le même rapport. Il en diffère toujours au moins par la situation dans la durée consciente. Séparé par la copule (qui ici, tout en remplissant sa fonction d'union marque précisément la distinction), il ne se confond pas avec l'état de pensée exprimé par le premier terme auquel il succède. La démonstration de la synthèse effectuée entre deux hétérogènes dans toute égalité mathématique, après Kant, après Descartes, n'est plus à faire.

On ne peut donc donner à l'identité même celle qui se traduit par le signe « égal », = même celle qui se traduit par le signe « identique à » ≡, un sens ontologique, à moins de formuler soit un cercle, soit un impensable, un néant logique.

Mais il y a un autre moyen, beaucoup plus souple et beaucoup plus fécond de donner un sens ontologique à l'identité. C'est de donner à cette notion le sens d'*identification*. On ferait mieux peut-être de substituer ce dernier mot au premier. Il est moins à effet ; mais il évite l'équivoque. Il ne prête plus aux objections que nous venons de signaler. C'est au fond le très vieux sens que lui donnait la scolastique dans le célèbre adage : *causa adæquat effectus*. C'est celui que Ribot, dans son livre sur l'évolution des idées générales, considérait comme le terme-limite de la causalité scientifique. Nous avons nous-même adopté ce sens après lui et de la même façon, en cherchant à

fonder, grâce à cette acception, l'induction sur la possibilité de la déduction.

Seulement tandis qu'avec Ribot, nous donnons à cette signification une valeur relationnelle, la scolastique et nombre de philosophes lui ont donné une valeur ontologique. Est-ce admissible ?

Synthétisons la doctrine comme les précédentes sans nous attacher à un exposé particulier. Elle est d'un schéma très simple. La science tend à créer en continuant la perception sensible une ontologie nouvelle destinée à remplacer celle du sens commun. Pour ce faire, elle transpose la réalité en termes d'espace géométrique : c'est l'œuvre de la mathématique, méthode scientifique par excellence. Dans cette transformation, chaque fait est représenté par une certaine configuration spatiale : ce que Descartes appelait étendue, figure et mouvement. Le mouvement est le moyen de passer d'une configuration spatiale à une autre, par déplacement des éléments de la configuration. Un carré devient un rectangle ou un parallélogramme de même surface : le parallélogramme de Watt des machines à vapeur. On peut dire que la théorie cinétique des gaz transpose toute matière sous cette forme. L'espace étant homogène, un fait nouveau n'est que le fait antérieur, à la disposition près des éléments qui le constituaient. Mais ces éléments sont restés identiques. La matière est un être — Protée, mais toujours le même être sous les apparences protéiformes.

Un cycle fermé est un parallélogramme de Watt, qui prend toute une série de configurations et revient toujours à celle qu'on a prise pour origine. Le retour éternel n'est que l'extension à l'Univers de la notion de cycle fermé (ce qui est exact d'ailleurs).

La thèse est évidemment spécieuse. Seulement à y bien réfléchir, croyons-nous, elle doit être critiquée comme la précédente. Elle joue sur le mot *identification* comme l'autre sur le mot identité.

Ou l'identification a son sens plein : Et sans aller jusqu'à la limite, admettons au moins qu'on puisse mettre le signe « égal » entre tous les termes sur lesquels elle porte. Et alors les configurations sont illusoires : apparences qui recouvrent l'espace homogène, dernier et seul terme de l'ontologie. Bien près du néant, sinon le néant lui-même. En réalité nous nous retrouvons devant la caricature du monisme de l'Eléate.

Ou chaque configuration est bien réelle par elle-même. Mais alors il n'y a plus identification au sens propre, et c'est un abus d'employer ce mot. Il n'y a surtout plus identification au sens ontologique. Il est inutile de refaire la démonstration de Kant au sujet des nombres. 11 est *autre* chose que 7 + 4. Ces deux expériences sont absolument hétérogènes. Bien autre chose si, au lieu de nombres, nous prenons des configurations spatiales, et les mouvements de leurs éléments, avec leurs vitesses, leurs accélérations, leurs liaisons et leurs degrés de liberté. L'hétérogénéité de chaque moment par rapport aux autres ne laisse plus l'homogénéité de l'étendue que comme un fond lointain et uniforme sur lequel ressortent les nuances infinies d'un portrait. Le *même* disparaît presque devant l'*autre*. Il n'en forme plus que le lien extérieur. Et nous voyons déjà poindre ici le sens *relationnel* de l'identification. En tout cas s'anéantit absolument le sens ontologique. Que dire alors, si la science est conduite à ne plus même admettre l'homogénéité de l'espace, si le continu comporte des coupures, si le discontinu et le fini s'imposent dans l'expérience, comme tant de philosophes et non des moindres, de Pythagore, de Platon et d'Aristote à Renouvier ont cru qu'il s'impose à la raison ou qu'il est imposé par la raison : le continu seul étant irrationnel et pouvant d'ailleurs être rationalisé à son tour ?

Notre conclusion ne peut être ambiguë. Une identification ontologique est un non sens, tout comme

une identité ontologique. Le principe d'identité ne peut avoir qu'un sens relationnel. Qu'entendons-nous par là ?

Examinons, chez celui qui l'a formulé le premier, le sens du principe. Il est le ressort du jugement. C'est en vertu du principe d'identité que nous pouvons dire qu'un homme est mortel. Est-ce à dire que « homme » est identique à « mortel ». Cela n'a aucun sens. Un homme est un homme et ne peut être autre chose qu'un homme. Ce n'est pas aux philosophies la qualité que sont et le platonisme et l'aristotélisme qu'il faut apprendre l'hétérogénéité foncière de toutes les qualités, de tous les êtres. La critique sophistique si l'on donne à l'identité un sens ontologique est irréfutable, tout comme les arguments de Zénon, si l'on donne à la divisibilité de l'espace un sens ontologique. Le jugement et le raisonnement, la connaissance sont aussi impossibles dans le premier cas, que le mouvement dans le second. Et cependant il y a des jugements, des raisonnements, comme il y a des mouvements.

C'est que précisément, de même que l'espace ne se comprend que par les relations de continuité, le jugement le plus simple ne se comprend que par une participation, une implication, une compatibilité entre les qualités qu'il relie. L'hétérogénéité foncière des termes est réclamée par le jugement ; sans cela il n'y aurait *rien* : la tautologie du néant. Participation, compatibilité, implication, tout cela est devenu dans la science moderne, comme dans la logique et la grammaire, des relations, des rapports. Et le principe d'identité, ou d'identification ne porte que sur des rapports, et non point sur des êtres. La connaissance est nécessairement relation. D'ailleurs, à y bien penser, est-ce que connaître, sinon par métaphore, est autre chose qu'établir des rapports entre des données. Le donné lui-même, par une sympathie presque indéfinissable, peut bien soutenir une action dans une large mesure

inconsciente, car elle est imprégnée d'instinct ou de sentiment. Mais dès que nous voulons prendre conscience — et prendre conscience, c'est le commencement, le moyen et la fin, de toute connaissance, de tout savoir, — ce sourd travail s'explicite en relations. Nous n'avons d'autre procédé que la recherche de ce qui constitue ce donné, ses éléments, ses conditions : toujours certaines relations entre lui et autres choses qui n'étaient pas données du même coup. On connaît par une série de passages d'hétérogènes à hétérogènes.

Dire que l'homme est mortel, c'est montrer qu'homme implique la propriété de mortel, qu'il y a compatibilité entre les propriétés qui constituent l'homme, et celle de mortel, qu'il y a participation de l'idée d'homme à celle de mortel, que l'ensemble des mortels comprend l'homme, etc. Qu'on le prouve comme on voudra, c'est établir un rapport contre homme et mortel. Un raisonnement, ce sera de même établir un rapport entre une raison et une conséquence entre des raisons et des conséquences. Ainsi le principe d'identité n'a d'autre sens qu'une identification relationnelle ; et une identification relationnelle n'a d'autre sens qu'un lien établi entre des choses hétérogènes. Le « même » ne s'applique qu'aux rapports qui existent entre des « autres ». Et ces rapports ne s'identifient pas. Ils se déduisent, se concluent. Identité signifie passage — sans plus, ou compatibilité — sans plus. Et nous ne mettrons autre chose sous ce mot qu'en appauvrissant et en déformant le réel : ce que font toutes les décadences scolastiques, — ce, contre quoi protestent tous ceux qui rénovent et innovent. Le réel est une richesse infinie. Sur elle notre connaissance jette le filet de l'ordre sous lequel elle s'étale et se dispose.

Au fond le principe dit d'identité est un principe d'ordre. On n'identifie pas, on ordonne, on organise. Nous verrons tout à l'heure dans quelle mesure, pour-

quoi et comment. Pour le moment nous sommes encore en plein sur le terrain de la philosophie kantienne. Nous allons en sortir.

V

La confusion originaire du subjectif et de l'objectif.

La question que nous poursuivons se repose maintenant en effet dans toute sa force, et de façon pour nous définitive.

Cet ordre d'où vient-il ? Le mettons-nous dans les choses, comme le pense l'idéalisme critique, et, de façon moins cohérente, le subjectivisme empirique ? Y est-il déjà comme le soutiendrait un dogmatisme réaliste ? L'idée de retour éternel est-elle en nous qui accordons les choses à nous comme nous pouvons, en rejetant dans l'inconnaissable tout ce qui n'y entrera point ? Sont-ce au contraire les choses qui plient notre esprit à leurs contours, l'idée étant la peinture des choses dans le miroir inerte d'un esprit, dont on se demande pourquoi il est et à quoi il sert ?

Notre réponse, c'est que ni l'un ni l'autre des termes de l'alternative ne paraissent admissibles.

Il est tout à fait abstrait de poser en face l'un de l'autre un objet et un sujet qui auront, selon des préférences toutes gratuites, et suivant les cas, à se modeler l'un sur l'autre. Il y a, comme point de départ désormais obligatoire à toute théorie de la connaissance, à poser le flux de conscience ou, pour renvoyer à un schéma particulier de ce flux, la durée Bergsonienne, qui peut jusqu'à un certain point le symboliser.

Seulement nous ne croyons pas que ce soit là le réel sans réserves. Nous serions bien embarrassés de le prouver. Disons que c'est la forme du réel que nous pouvons appréhender, de la façon la plus plausible, antérieurement à tout travail de connaissance.

Est-elle déjà une résultante construite dans les pro-

fondeurs d'un inconscient ineffable ? N'est-elle qu'une façon grossière, sommaire, malgré toute sa richesse, d'appréhender un réel sous-jacent plus profond ? Une appréhension plus primitive, et moins évoluée que celle que nous rencontrerons plus tard, dans le sens commun, puis dans la science, puis dans une sagesse supérieure à la science ? Va-t-elle moins loin que les acquisitions ultérieures qui pénétreraient alors plus qu'elle dans le réel ? Ou est-elle une prise de possession directe, immédiate, du réel ? La question est fondamentale en métaphysique : La connaissance procède-t-elle, pour atteindre le réel, du médiat à l'immédiat, par l'analyse, comme le croirait un Descartes, ou de l'immédiat au médiat comme dans toute philosophie de l'intuition directe ? Le problème engage toute la méthode et tous les résultats, tout le système philosophique. Mais, pour nous, heureusement, il ne s'agit pas de cela. Nous ne visons qu'à dégager l'enseignement que nous croyons pouvoir tirer d'un chapitre d'histoire des sciences. Nous prendrons donc pour accordé le point de départ, l'hypothèse au sens platonicien du mot. Nous ne voyons pas le moyen de nous passer de cette hypothèse. Il nous semble indubitable que si nous essayons d'analyser et de retrouver de quoi peut partir la connaissance, le donné relativement primitif, au delà duquel tout est nuit pour nous, nous soyons obligé de partir d'un flux d'images, d'un flux de représentation, d'un flux de conscience comme on voudra. Ce flux c'est ce que nous retrouvons comme terme ultime : « L'Univers est représentation ». L'idéalisme subjectif nous paraît hors de critique sur ce point. Ce qu'il y a d'abord, ce sont des états de conscience. Là où la critique peut commencer, — là où pour notre part nous ne pouvons suivre, — c'est quand on passe, sans plus, des états de conscience à *ma* conscience, de la représentation à *ma* représentation, des images, aux images de *ma* pensée. Si Hume n'avait pas compliqué son hypothèse par

celle d'atomes psychologiques, qui ne paraissent guère répondre à l'expérience, l'orientation de sa théorie qui fait du moi, du « je », une concrétion secondaire nous paraîtrait encore la bonne. Le flux d'être dans lequel se découperont ensuite l'Univers et moi, l'extérieur et l'intérieur, ne peut se représenter que comme un flux d'images impersonnelles, un continu de conscience impersonnelle. C'est la seule signification possible de l'inconscient, dirions-nous en passant. Ce flux de conscience impersonnelle voilà l'état originel du donné. Il déborde — de l'infini — la conscience personnelle et le monde extérieur.

De cette forme indifférenciée où le sujet ne se distingue pas de l'objet, où confondus et mêlés ensemble, l'activité qui veut connaître, le « percevoir », et les activités qui se révèlent peu à peu à celle-ci, « l'être-perçu », sont en communion, en sympathie, en participation intime les unes avec les autres, et ne font qu'une, on voit, dans l'histoire de la connaissance elle-même, se distinguer peu à peu deux domaines : les choses qui ne dépendent pas de nous, — mais sur lesquelles dans une certaine mesure nous pouvons agir indirectement, en connaissant la manière dont elles dépendent les uns des autres — et les choses qui dépendent directement de nous. Le non-moi et le moi, l'Univers et moi, la matière et ma pensée, l'objet et le sujet, autant d'expressions qui affirment cette distinction, cette opposition. A ne prendre que l'histoire des idées dans le monde occidental depuis le VIIe siècle avant Jésus-Christ, on voit cette opposition se nuancer, s'accentuer et se préciser de plus en plus. C'est dans cet ensemble historique, — le moins mal connu de tous — que la coupure s'est prononcée de la façon la plus claire et la plus distincte. Mais on la retrouve dans tous les ensembles que l'histoire des civilisations a atteints, et son évolution semble se faire de même, moins nette en général, voilà tout.

VI

La notion d'objet et le retour éternel.

Ce qui caractérise l'objet, la matière, sur quoi porte la connaissance scientifique dans notre civilisation, c'est précisément le départ de plus en plus net entre les propriétés de cet objet et les propriétés du sujet, de la pensée. Ainsi est-on arrivé à formuler peu à peu l'opposition des deux termes, à les dresser l'un en face de l'autre, l'un contre l'autre. Dans le magma, le continu indifférencié et mouvant qui représente, à notre analyse, l'état originel pour ce qui a conscience, c'est-à-dire pour l'être (1), les nuances se subdivisent en deux groupes d'images : les unes vidées de tout ce qui nous représente essentiellement à nous-même : l'objet ; les autres vidés de tout ce qui serait foncièrement indépendant de nous-même, et nous résiste ou nous contraint : le sujet.

L'objet qui est la matière (nous ne connaissons par inférence les autres êtres pensants qu'à travers elle, car nous ne connaissons directement comme sujet que nous-même), et le sujet qui est notre pensée consciente, semblent ainsi s'opposer nécessairement, en première approximation et en première apparence par des caractères bien tranchés, dont nous ne prétendons pas énoncer ici une liste exhaustive. Nous ne les énumérons qu'à titre d'exemple, en commençant toujours les couples par les caractères de l'objet qui seul intéresse cette étude :

Inconscience-conscience ; déterminisme-liberté (2) ;

(1) Nous ne pouvons nous représenter d'être qu'en une conscience, ou en fonction d'une conscience. Quelque chose qui ne saurait pas qu'il est, ou dont l'existence ne serait pas sue, est rigoureusement et par définition, un néant.

(2) Nous ne cherchons pas ici si ces propriétés sont réelles ou illusoires. Nous les prenons dans l'expérience comme le résultat de l'évolution dont nous venons de parler. De même, certaines indiquent plutôt une tendance vers la propriété, que sa possession intégrale et indiscutable.

inertie-activité ; réductible à la quantité-irréductible à la quantité ou qualité pure ; multiplicité-unité ; spatialité-durée ; stabilité-fluence ; tout fait-se faisant ; hasard-finalité ; déductible-intuitif ; causalité fonctionnelle-causalité efficiente (1).

Or il est facile de voir que les premiers termes de ces couples, les termes caractéristiques de l'objet, sont tous apparentés à l'idée de retour cyclique. Ils la conditionnent pour la plupart : Si bien que nous pouvons instituer un nouveau couple qui se formulerait : retour éternel-vieillissement ; réversibilité-irréversibilité.

L'idée de retour éternel caractérise l'objet, comme l'idée contraire de vieillissement, les idées d'activité progressive, de moment spécifique et irréductible, de durée irréversible, de création sans cesse continuée et contingente, de finalité, d'orientation vers un terme en tout cas, semblent caractéristiques du sujet.

Et déjà sur la question débattue nous pouvons conclure. Il n'y a pas d'imposition *a priori* de l'esprit aux choses, ni *a posteriori* des choses à l'esprit, de contrainte exercée par l'un sur l'autre dans la loi de retour éternel à laquelle est subordonné l'objet, comme dans toutes les autres lois constitutives ou régulatrices de la connaissance (ces deux épithètes sont désormais identiques). Plus haut que l'opposition de l'objet et du sujet, il y a ce que nous pourrions appeler, en donnant à ce mot une signification universelle, l'expérience primitive ou première. Du sein de cette expérience synthétique se dégagent peu à peu la grande distinction de l'expérience externe, et de l'expérience interne, de l'objet et du sujet ; puis les premières directives qui sont soit des principes

(1) Nous entendons par causalité fonctionnelle le sens criticiste et positiviste donné par Kant, Comte, St-Mill et Mach, par exemple, à la causalité : une succession ou une concomitance pures et simples, un ordre dans l'apparition des faits, une covariance et non une production des faits.

universels communs à l'objet et au sujet, soit des principes qui peuvent ne s'appliquer qu'à l'un ou à l'autre. Mais ils appartiennent par leur origine et leur genèse aussi bien à l'un qu'à l'autre. Ils sont tout autant *a posteriori* qu'*a priori* ; ou plutôt les deux termes n'ont plus de sens.

L'idée de retour éternel est de ces derniers. Elle appartient à cette partie de l'Univers de la conscience, ou de l'Univers des images et des idées, qui se détache de l'autre pour constituer l'objet, en se vidant de toutes les nuances que nous appelons par contraste subjectives. Elle est une caractéristique de l'objet, et, si l'histoire que nous en avons faite est exacte, une caractéristique essentielle, car elle revient au moment même qu'on voudrait s'en débarrasser. Telles sont, en somme, toutes ces idées-maîtresses de la science que nous avons appelées idées à éclipses. Ce sont des idées qui tendent à devenir des régulatrices permanentes, et par suite et à la fois, des lois constitutives de l'objet et organisatrices de la connaissance de l'objet.

Il est probable que toutes les notions fondamentales,qui par suite de ce caractère sont vraiment structurales, et de ce à quoi elles s'appliquent, et de l'intelligence qui s'y applique, ont passé par les mêmes phases. Les notions même les plus essentielles, celles qui par leur *principauté*, par les fonctions *principales* qu'elles remplissent, ont reçu le nom de *principes*, ne sont pas une charpente toute faite. Le criticisme, là, est encore bien trop voisin du dogmatisme absolutiste inhérent à toute pensée relativement primitive. Les catégories sont infiniment plus souples que ne les ont vues un Aristote ou un Kant. Les vérités éternelles ne le sont que pour l'avenir (et avec des amodiations futures). Elles ne le sont pas dans le passé d'une histoire de l'esprit humain, c'est-à-dire dans un bien petit fragment de l'Univers de la conscience. Elles s'élaborent avec la connaissance, puisque

la connaissance est sans cesse évolutrice : une *création continuée*. Le savoir se fait ; il n'a jamais été tout fait, même dans ses parties les plus simples et les plus essentielles. Il n'est jamais fait. Il se gagne. C'est au cours de ses gains que se précisent les notions générales qui l'organisent. La charpente et le plan se construisent avec l'édifice lui-même,comme ces vieilles cathédrales dont le dessin a changé sans cesse, au fur et à mesure de leur construction.

Une idée constitutive de l'intelligence doit donc nous apparaître beaucoup plus comme une tendance et un besoin que comme une loi fatale et éternelle. Elle ne doit tendre vers ce caractère qu'après des luttes, des retours, des éclipses que retrouve l'histoire pour les acquisitions les plus récentes. Il faut voir la pensée sous son aspect historique, et l'histoire de la pensée, comme toute histoire, sous un aspect dynamique.

C'est l'objet que nous voyons se constituer en quelque sorte devant nous, à mesure que nous en prenons connaissance, ou conscience (ce qui revient au même). Connaître c'est bien construire l'objet, mais c'est aussi et en même temps, du même coup, apprendre comment l'objet est construit ; car cette construction de l'objet ne se fait ni par, ni pour un esprit étranger qui cherche à s'y adapter du dehors. Elle se fait au sein d'une expérience qui comprend originellement à la fois objet et sujet. La construction de l'objet s'effectue avec des réalités, en pleine réalité. Seulement elle n'est pas toute la réalité, pas plus que le sujet qui s'organise d'autre part, lui aussi, en pleine réalité et qui est tout réalité (une pensée irréelle serait une absurdité dans les termes, et l'avoir mis en lumière comme il l'a fait est un des titres immortels du philosophe des philosophes : Descartes). L'objet ne retient du réel que ces caractères, qui pour cela ont été appelés *objectifs*. L'esprit garde pour lui tout le reste.

Mais prenons-y garde : là encore, il ne faut pas croire

à un objet tout fait, définitif, statique, pas plus qu'à un sujet dont nous aurions à jamais épuisé l'intuition. Il faut les concevoir d'une façon dynamique. C'est pourquoi l'histoire des idées, l'histoire de la pensée, l'histoire d'un moment de la pensée, d'une idée entre autres, sont si pleines de philosophie. Elles nous renseignent sur ce qui est, sur ce que nous pouvons atteindre de ce qui est. Il y a, à ce point de vue dynamique, passage constant du subjectif à l'objectif et réciproquement. Les deux notions se dépouillent, et se laissent, de pas en pas, apercevoir plus clairement et plus distinctement. L'idée de retour éternel est un moment — moment actuel — de la constitution plus précise de l'objet et de sa distinction d'avec le sujet.

L'objet se constitue au fur et à mesure de la conscience que nous en prenons. Et ce que nous appelons aujourd'hui science, par opposition à nos autres manières de connaître, c'est précisément cette conscience progressive, continue de l'objet.

Méthode expérimentale et rationnelle (toute méthode, croyons-nous, est à la fois cela, à des combinaisons diverses), méthode scientifique, prise de conscience de l'objet, autant d'expressions synonymes.

VII

Le retour éternel et le rejet du subjectif.

L'idée de retour éternel, comme les principes de conservation qui la conditionnent, ou qu'elle entraîne a été progressivement mise en lumière par l'application de la méthode. Elle marque une phase où dans le départ de l'objectif et du subjectif certains éléments du réel sont rejetés de l'objet, et réservés au sujet. Ils n'appartiennent pas à la matière, car nous pouvons appeler maintenant l'objet de ce nom plus correct emprunté au vocabulaire du sens commun ; ils appartiennent à l'esprit. Depuis l'aurore des scien-

ces de la matière ou de la science tout court (car il n'y a peut-être de sciences de la vie, de sciences psychologiques ou sociales, que dans la mesure où il peut y avoir matérialisation, objectivation des faits sur lesquels elles portent), le progrès de la connaissance consiste à diminuer toute représentation empruntée au domaine subjectif, dans l'explication, l'interprétation de l'ordre matériel ou objectif.

Les notions de matière et d'objet se sont établies et continuent à s'établir selon ce processus. Les modes magiques, prélogiques, puis hylozoïstes, puis qualitatifs de ces notions, n'en sont que les étapes : d'abord, imprégnées de subjectivisme, puis de plus en plus débarrassées de cette imprégnation qui, vue sous un angle plus restreint et d'une façon plus superficielle, a été appelée anthropomorphisme.

En sont-elles complètement débarrassées ? C'est ce que l'histoire actuelle que nous venons de retracer ne permet guère d'affirmer. Comme la lutte entre le dynamisme et le cinétisme à laquelle elle se rattache, l'énergétisme et cette espèce de crise de la physique qu'on a pu noter dans le dernier cinquantenaire du XIXe siècle ne sont, nous semble-t-il, qu'un retour offensif de la subjectivité dans la conception de l'objet et de la matière. Aussi l'esprit le plus philosophique parmi les tenants des théories antimécanistes ne s'y est pas trompé : Duhem a voulu tendre la main à Aristote et à la scolastique par-dessus Descartes. L'idée d'irréversibilité entraîne nécessairement l'idée d'orientation, de sens général de l'évolution universelle, par suite s'apparente forcément avec les idées d'origine, de fin et de durée finie de l'Univers. Si celui-ci existait de toute éternité, le nivellement final et la fin du monde seraient données : il ne se passerait plus rien ce qui, en y réfléchissant, équivaut à : il n'y aurait plus rien. Enfin l'idée d'irréversibilité est liée à la conception que l'énergétisme se fait de l'énergie, de la spécificité des formes de l'énergie, en particulier

de la chaleur. C'est la philosophie de la qualité qui reparaît sous l'armure mathématique de la technique.

Or, qualités, affirmation d'une orientation dans l'Univers, le haut et le bas dans l'échelle des températures remplaçant le haut et le bas, lieux naturels des éléments physiques, idée de création calquée sur l'acte volontaire, idée de commencement, de sénescence, et de mort calquée sur notre propre vie, tout cela réintroduit l'anthropomorphisme et l'anthropocentisme, qu'avaient essayé d'exorciser la Renaissance et la pensée moderne. Elles ont voulu un Univers infini dans l'espace et se comportant, quel que soit le moment choisi par la création, comme s'il était infini dans la durée (qu'on se rappelle les premiers paragraphes du Traité du Monde de Descartes) ; un Univers où il n'y a ni haut ni bas, un Univers qui laisse transparaître partout l'homogénéité de sa structure, l'isotropie en somme du fond sur lequel se tissent tous ses événements, le caractère géométrique et mathématique de ce fond où toutes les figures qui s'y tracent sont muables les unes dans les autres par décomposition et recomposition comme les nombres ou les figures : l'Univers du retour éternel, la machine cyclique parfaite.

L'effort de la physique s'est bien exercé depuis lors à désubjectiver l'objet, à en éliminer les qualités sensibles, secondes, accident contingent de notre structure physiologique, orienté comme l'instinct, le sentiment, la perception extérieure vers l'action et non vers la connaissance. Malgré les retours offensifs du dynamisme, auquel se réapparente sous une forme nouvelle l'énergétisme, le cinétisme a poursuivi sa marche, se compliquant, s'assouplissant, s'enrichissant pour étreindre plus de réel et l'étreindre en le serrant davantage. Mais il est resté le cinétisme, la doctrine du retour éternel dont l'histoire contemporaine est en train de ramener le triomphe.

Le sens de cette victoire nouvelle — après tant

d'autres — de cette réapparition toujours plus nette de l'idée, après les critiques que des faits nouveaux ont semblé à plusieurs reprises suggérer pour l'anéantir, n'est guère douteux pour nous.

L'idée de retour éternel réapparaît toujours parce qu'elle est liée à l'idée d'objectivité. Elle en est une des pièces maîtresses. Et la science n'est que la poursuite de l'objectivité, la construction en même temps que la découverte, comme en une réminiscence Platonicienne, des lois de l'objet distinguées peu à peu au sein de la confuse expérience primitive.

VIII

L'objet doit se suffire à lui-même.

Or, songeons-y bien, l'objectivité n'est pas autre chose que la détermination des choses en tant qu'elles se suffisent à elles-mêmes, qu'elles n'ont pas besoin de nous pour exister, qu'elles sont *indépendantes de nous*. L'indépendance par rapport à nous, voilà le caractère éminent, l'essence de l'objectif, par opposition au subjectif. Il en résulte que rien ne doit y subsister de tout ce qui porte la marque de l'organisations humaine, tout ce qui est fonction des conditions de l'existence humaine. Les qualités sensibles, fonction de nos besoins pratiques, et de notre action sur le monde extérieure, apparentées à l'instinct ; la volonté ; la contingence nécessaire à l'acte libre ; la finalité, fille de l'action ; le vieillissement, l'usure, la marche irréversible qui rappelle la vie et la durée, tout cela est peu à peu éliminé de la matière objective, après des résistances et des retours sans nombre. Car constamment des éléments, mêlés de subjectivité, éliminés d'abord par des schémas trop simplistes de l'objet, y reviennent. Et alors le travail doit recommencer. Ainsi le principe de Carnot et l'énergétisme ont traduit tout un domaine nouveau et immense introduit dans l'objet de la phy-

sique, jusque-là confinée à l'énergie mécanique, et à la machine à simple transformation de mouvements. Le travail d'élaboration dont nous venons de faire l'histoire c'est, après la nécessité de faire entrer dans la physique des éléments jusque-là inaperçus, la réduction de ces éléments aux lois générales qui déterminent l'indépendance de l'objet.

Cette indépendance absolue de l'objet n'est jamais affirmée aussi précisément, aussi clairement et distinctement, que dans le concept de retour éternel, l'affirmation du cycle fermé constitué par tout système isolé, donc finalement par la totalité des systèmes, seul système vraiment isolé, qui ne reçoit rien de l'extérieur ne lui rend rien, — et pour cause — : l'Univers physico-chimique.

Nous faisons ici la réserve de style — impérieuse d'ailleurs — que faisait Descartes, au début du Traité du Monde. Rien n'empêche que cet Univers ait été créé à un moment donné, et soit anéanti à un moment donné. Mais l'anéantissement sera un acte destructif d'une volonté créatrice, comme la création. Il n'est pas dans l'idéal scientifique, dans la nature de l'Univers physico-chimique, de l'Univers objectif, de porter sa fin en lui-même et de s'y acheminer spontanément. De même qu'il n'est pas dans sa nature de commencer *ex nihilo*. Qu'il soit créé ou qu'il soit éternel, il est organisé comme une machine qui peut marcher éternellement. L'usure et l'inutilisabilité progressive ne peuvent appartenir qu'aux machines humaines, qui portent en elles l'imperfection anthropomorphique et subjective. Comme l'affirmait le vieux mécanisme, l'Univers créé, reflet de la Toute-Sagesse et de la Toute-Puissance divine, réalise, seul, le mouvement perpétuel, ce mouvement perpétuel refusé à l'imperfection de la machine humaine, reflet d'une intelligence finie. Et pour sortir des symboles théologiques qui ont enveloppé le berceau du mécanisme et les efforts d'objectivité de la Renaissance et du

XVIIe siècle, disons, pour notre compte, en un langage plus moderne :

Pour que la matière se suffise à elle-même et soit indépendante de nos concepts et de nos images, pour qu'elle soit vraiment *l'objet*, il faut qu'elle obéisse comme à sa loi suprême, à la loi de retour éternel. Dans toute autre conception elle reste subjective par certains côtés, liée à nous, comme à un repère obligatoire. Dans l'autre cas, elle a ses repères à elle, et tout à elle.

IX

Réalisme de la solution.

La théorie cinétique des gaz, la physique actuelle réalisent-elles absolument l'idéal objectif ? Il serait insensé de répondre à la question, car nous ne savons pas ce que réserve l'avenir, ce que réserve ce passage constant du subjectif à l'objectif dans l'œuvre de la connaissance. Nous croyons simplement pouvoir conclure que la physique s'efforcera toujours d'obtenir l'objectif.

A nos yeux, c'est son but, et sa raison d'être : c'est le but et la raison d'être de la science.

Mais ne faisons-nous pas rentrer, par une autre voie, par la voie d'une théorie de la connaissance, le subjectif dans l'objet, non plus comme élément de la construction scientifique, mais comme condition générale de toute construction scientifique ?. En montrant la poursuite de l'objectif comme un idéal auquel s'efforce toute science, ne disons-nous pas au fond que nous essayons de plier l'objet de la connaissance à une fin subjective ?

Ce serait bien mal nous comprendre. Nous nous sommes déjà efforcé d'éviter l'équivoque en esquissant sur ce point un fragment de théorie de la connaissance, en refusant aussi bien un idéalisme *a priori* qui imposerait les lois du sujet à l'objet, qu'un empirisme brutal qui ferait du sujet le miroir où se reflète

l'objet. Mais il faut marquer ici avec plus de force et plus de netteté la position réaliste dans laquelle nous nous situons.

L'objet n'est pas création du sujet, pas même organisation des images qui le constituent par l'esprit. La construction de l'objet, par le travail scientifique, c'est l'art de démêler les lois propres de l'objet, de cette partie du donné qui ne dépend pas de nous : lois réelles, parties réelles d'un donné réel, — comme la pêche est l'art de démêler le poisson d'avec l'eau. L'expérience du réel nous montre que, dans le réel, s'isole à mesure un domaine qui, à la limite, se suffit à lui-même, par rapport à notre pensée, du moins, sinon par rapport à toute pensée, ce qui nous semblerait un non sens. C'est le domaine objectif de la science. Et la loi du progrès de la connaissance scientifique c'est de tendre — comme vers sa limite naturelle — à cet isolement, à cette indépendance complète. Que la limite puisse être atteinte ou non, c'est une autre question.

La clôture de la période historique que nous avons étudiée s'est bien faite en ce sens et sous la pesée de l'expérience c'est-à-dire du réel. Nous ne pourrions mieux conclure qu'en nous efforçant de le montrer.

CHAPITRE II

LA RÉALISATION DU RETOUR ÉTERNEL

I. — L'expérience et le cinétisme.
II. — La chaleur n'est pas une forme de l'énergie.
III. — Il est nécessaire que le principe de Carnot soit violé.
IV. — Extrapolation et connaissance.
V. — La possibilité de l'extrapolation.
VI. — Improbable et probable.
VII. — La réalité du retour éternel.

I

L'expérience et le cinétisme.

L'ancien mécanisme avait été lentement, laborieusement élaboré, malgré quelques anticipations de génie, mais plus verbales et métaphysiques que scientifiques, par toute l'expérience physique jusqu'à la Renaissance. C'est l'expérience qui détruisit l'hylozoïsme et le dynamisme antérieurs, la physique des qualités substantielles et des puissances. De l'expérience sortent la théorie des machines simples, les premiers principes d'hydrostatique, les lois de la chute des corps, de la pesanteur, de l'équilibre des liquides, les premières lois de l'optique. Il y fallut presque vingt siècles, d'Euclide et d'Archimède à Galilée, Stevin, Descartes et Pascal.Le géométrisme y eut sa part. Mais la géométrie Euclidienne n'est-ce pas la première grande théorie physique, l'étude *purement objective* de la métrique spatiale, la physique de l'espace pur ?

Cette condensation d'expériences continuera jusqu'aux remaniements profonds de la période énergétiste. Ceux-ci sont l'aveu de la défaite d'un schéma trop simpliste dans la poursuite de l'objectif. Ils ame-

nèrent d'abord cette idée que l'énergie thermique est irréductible aux énergies mécaniques, qu'elle doit avoir dans la construction de l'Univers physique une place à part, à cause de l'irréversibilité qu'elle entraîne.

Or, c'est l'expérience encore, et nous entendons par ce mot, nous référant à ce que nous en avons dit déjà, la prise de contact de l'esprit avec le réel, qui impose précisément le *fait*, ici central, des *fluctuations*. Il y a des cas où le principe de Carnot est violé de façon continue et flagrante. De l'énergie mécanique semble puisée aux dépens de la chaleur du milieu, et en le refroidissant, pour faire remonter une parcelle matérielle, contrairement aux lois de la pesanteur, au-dessus de son niveau antérieur ; et cela une multitude de fois dans un mouvement incessant et très rapide : voilà le mouvement brownien. Ainsi des autres.

C'est l'expérience enfin qui, d'autre part, nous amène à formuler et à étendre de façon sans cesse plus précise la théorie cinétique des gaz, jusqu'à en faire la théorie cinétique de l'Univers *matériel*. Nous ne reviendrons pas sur un historique dont nous nous sommes efforcé de marquer les grandes étapes expérimentales.

II

La chaleur n'est pas une forme de l'énergie.

L'expérience nous amène donc à la conclusion suivante, et non point les vues *a priori* de l'esprit : la chaleur n'est pas une forme spécifique de l'énergie. Ce n'est même pas une forme de l'énergie. C'est un mode du mouvement. Elle n'est partiellement inutilisable que parce que son facteur d'extensité, l'entropie, exprime du mouvement désordonné, alors que nous ne savons utiliser que du mouvement ordonné, c'est-à-dire un mouvement d'ensemble global, et non pas le mouvement des particules ultimes de la matière.

Le mouvement ordonné tend vers le mouvement désordonné à mesure que les circonstances exceptionnelles qui l'ordonnent disparaissent. Car le mouvement spontané, sous les seules normes de la loi d'inertie et des lois du choc, — des lois de la mécanique rationnelle, — est, en fait, à cause de l'immensité du nombre des particules qui en sont animées et des accidents innombrables, eux aussi, du choc,une distribution dans toutes les directions possibles, soumise aux pures incidences du hasard :

« L'irréversibilité n'existerait pas pour nous si nous pouvions suivre individuellement, comme on le fait pour les astres en mécanique céleste, le mouvement de chacun des atomes dont la matière se compose » (Langevin). Le principe de Carnot, sous la forme que lui a finalement donnée Clausius, exprime simplement le fait que nous ne pouvons pas suivre le mouvement des particules ultimes et que nous raisonnons sur des effets globaux, les effets de la loi des grands nombres, en négligeant les causes multiples, presque infinies qui les produisent.

III

Il est nécessaire que le principe de Carnot soit violé.

Le principe de Carnot n'exprime plus qu'une improbabilité très haute. Seulement une improbabilité très haute n'est-elle pas une impossibilité ?

Eh bien, non ! et c'est encore l'expérience qui nous impose cette conclusion.

Certes dans le calcul des probabilités, toute disposition nouvelle est indépendante des dispositions précédentes. La distribution la plus probable peut donc se répéter indéfiniment, chaque distribution n'engageant en rien celle qui la précède ou la suit. C'est le principe premier du calcul des probabilités au jeu de la rouge et de la noire. Chaque coup est nouveau, et après chaque coup, il n'y a aucune raison pour qu'une

couleur sorte plutôt qu'une autre. La même pourrait donc théoriquement sortir indéfiniment. En fait, expérimentalement, nous savons qu'il n'en est rien. Nous savons même que plus on prolonge le jeu, les deux couleurs, si la roulette est parfaite, tendent de plus en plus à égaliser leurs sorties. C'est ce dont nous persuade encore le calcul des probabilités quand il passe à l'examen théorique des chances, des complexions. Or si nous avions dix fois plus de cases noires que de cases rouges, au bout de dix mille parties par exemple nous verrions la noire sortir à très peu près dix fois plus souvent que la rouge. Les chances seraient de $\frac{1}{10}$ pour celle-ci. La rouge ne sera sortie que 1.000 fois. L'expérience confirme exactement ce calcul. Nous pouvons maintenant ajouter autant de 0 qu'il nous plaira à chacun de ces nombres 10 et 10.000. La rouge aura une chance de dix en dix fois plus petite de sortir, à chaque 0 ajouté. L'expérience confirmera cette déduction tout autant que la précédente. C'est la même. Les 0 ne font rien à l'affaire que diminuer à mesure, et en proportion définie, la chance de la rouge. Mais cette chance continue à exister *réellement* ; elle sera réalisée, tout comme les chances plus grandes, moins fréquemment, voilà tout, selon la loi exactement calculée. Rappelons le cas du mélange des gaz qu'il faut avoir ici bien présent à l'esprit :

« Prenons deux gaz d'abord superposés, sans mélange, dans un vase d'un décilitre de capacité. Le mélange une fois fait, il faudrait attendre un nombre de siècles représenté par l'unité suivie de 10 milliards de zéros pour avoir quelque chance (1) d'observer entre les deux gaz une séparation partielle... Il faut attendre au moins, pour avoir quelque chance de la constater, je ne dis pas 10 milliards de siècles, — ce qui ne

(1) Brunhes : *La dégradation de l'énergie*, p. 338 et 340, d'après Boltzmann, *Leçons sur la théorie des gaz.*

fait qu'un nombre de siècles égal à l'unité suivie de 10 zéros — mais un nombre de siècles représenté par l'unité suivie de 10 milliards de zéros. »

« On conviendra qu'il revient pratiquement au même de dire que cela ne se produira jamais », conclut Brunhes. Ah ! mais non. Nous devons dire au contraire, d'après le calcul, et d'après la totalité des expériences faites sur des séries évidemment beaucoup plus courtes : Cela se produira toujours, cela ne peut pas ne pas se produire, à moins du plus étonnant des miracles. Cela se produira à peu près mille fois par exemple, si nous prenons une période de temps mille fois plus grande que celle que Brunhes a envisagée.

« C'est inimaginable pour l'homme ». Et puis après. Nous ne parlons pas de l'homme, nous parlons de l'Univers. Nous parlons de tout ce qui est, et non de la petite moisissure apparue sur l'orange terrestre. Nous sommes encore bien plus loin de l'objet qui nous néglige que nous le sommes de Sirius. Notre mesure du temps par années solaires ne vaut que pour nos besoins pratiques. En changeant l'unité, toute relative, nous changerons à volonté l'énormité des chiffres. Là encore nous retrouvons l'illusion anthropomorphique et pragmatique qui transparaît si souvent dans l'énergétisme. Nous retrouvons une appréciation subjective. Le retour éternel veut nous placer d'emblée et en plein dans l'objectif : *sub specie æterni*. Et tous les temps dont on pose l'énormité ne valent pas une seconde devant l'éternité.

IV

Extrapolation et connaissance.

Une dernière remarque entre beaucoup d'autres — moins importantes — doit appeler l'attention. L'expérience humaine est un fragment bien minuscule devant l'expérience, qui pourrait fonder à l'état brut notre confiance dans le retour éternel. Nous retrou-

vons là l'hypercritique de toute induction et de tout savoir, et nous avons montré qu'elle n'était recevable que si l'on renonçait à tout savoir. Il faudrait même renoncer à la critique qui, elle aussi, ne vaut que si l'on admet une certaine « tenue » des procédés de raisonnement au delà de ce qu'on a rigoureusement le droit d'affirmer. Les seuls mots à prononcer seraient « que sais-je », sans plus. D'ailleurs Montaigne, dans l'absolu, a sans doute raison. Mais nous analysons un effort humain, et nous entendons rester sur le terrain où l'homme fait cet effort.

Qu'il soit entendu, une fois pour toutes, non seulement que tout raisonnement, mais tout jugement, toute idée, toute image même, qui toujours sont plus ou moins générales, exigent une *extrapolation*. Dire que la méthode scientifique extrapole l'expérience rigoureusement expérimentée, c'est dire qu'elle est de la connaissance, ni plus, ni moins. Il n'est même pas besoin de rappeler ici le vieil adage : « Il n'y a de science que du général ». Toute connaissance du particulier, qui est, dans notre science moderne, le fondement de la science est aussi une généralisation et une extrapolation. L'idée de retour éternel est une extrapolation — gigantesque — comme les principes de conservation, comme toute signification que nous donnons à un mot, à une image, comme le fait de mémoire le plus simple qui affirme un lien entre le souvenir et ce dont il est le souvenir.

Mais ce n'est pas là donner à ces faits, je ne sais quoi de subjectif, et justifier une intervention de l'esprit et de l'*a priori* qui les modifierait ou les altérerait. La part de l'esprit n'est pas un motif de scepticisme, ni même un argument de critique. L'esprit se laisse imprégner par le réel. Il travaille dans la connaissance, à dégager les lois du réel, à la suite de cette imprégnation. Or l'imprégnation n'est-ce pas l'extrapolation elle-même, l'universalisation de la trace retrouvée par lui sur le sable mouvant où il cherche

ses pistes ? L'esprit, dans la connaissance, est essentiellement le pouvoir de se répéter, comme il est le pouvoir de créer les nombres en ajoutant l'unité à elle-même, son premier acte aux autres. Constituer l'objet, c'est précisément pour lui découvrir ce qui se répète, à l'exclusion de la nuance de l'instant, à jamais spécifique et unique, qui s'agrège au subjectif.

C'est dégager de l'expérience commune ce qui est universel. Tout savoir est une puissance d'induction. S'arrêter à ce qu'on a constaté sans plus, serait se refuser au savoir, et nier toute prévisibilité, tout déterminisme, toute objectivité.

On le peut évidemment. Verbalement on peut tout, même sauter par-dessus son ombre. Mais il faut bien savoir que sur cette voie, on ne peut s'arrêter. Il faut arriver au néant. Qui ne veut rien ajouter à la donnée pour la connaître, ne connaîtra jamais rien.

Pour nous, d'ailleurs, la justification logique du procédé par lequel l'esprit crée la science, c'est évidemment la communauté primitive du sujet et de l'objet. Ils se retrouvent l'un dans l'autre et coïncident, à la fin de toutes leurs démarches, quelles qu'aient été les oppositions, les luttes rencontrées en cours de route : luttes qui sont les épreuves de l'ascension vers la vérité. Le sommet peut être inaccessible, il n'importe, pourvu que de temps à autre on ait monté.

V

La possibilité de l'extrapolation.

Mais toute proposition ne s'extrapole pas. Le signe qu'on monte c'est qu'on ne rencontre pas d'obstacle dirimant à l'extrapolation : la paroi lisse qu'il faut tourner, ou devant laquelle il faut redescendre. Le principe de Clausius nous a amené en face de la paroi lisse quand nous avons rencontré les premières traces des fluctuations. La théorie cinétique des gaz, la théo-

rie des probabilités appliquées aux faits de la thermodynamique n'ont, jusqu'ici, pas rencontré l'obstacle. L'extrapolation indéfinie, interdite à la thermodynamique classique, est permise à la théorie cinétique. Elle peut encore monter dans l'état actuel des choses. Le pourra-t-elle toujours ?

Avec bien des retouches, des mécomptes, de nouvelles victoires, sans doute. « Toujours » est un mot qui n'est pas humain. En tout cas, l'histoire de la science ne se prophétise pas. Et ici nous n'avons plus rien à dire.

La conclusion permise, c'est que le principe de Carnot-Clausius n'est pas une émanation de toute l'expérience. C'est là que gisent toutes les difficultés qu'on a rencontrées dans son interprétation. Bien entendu, il reste la loi de toutes les expériences à l'échelle du sens commun, de toutes les expériences assez éloignées des conditions où l'individualité moléculaire se fait sentir. La thermodynamique classique est un des plus beaux chapitres de la physique, et un des instruments les plus précieux de ses applications pratiques, une admirable et merveilleuse technique.

Il ne s'agit pas de la diminuer en fait. On ne le pourrait pas. Il s'agit simplement d'établir ses droits légitimes, et son domaine, son exacte valeur et sa portée théoriques. Tâche nécessaire pour la pensée critique, si toutefois la réflexion mérite elle aussi d'être dite « le propre de l'homme ». Il nous semble donc permis de conclure que l'idée de retour éternel est, comme tout résultat de la méthode expérimentale et rationnelle, une exigence expérimentale de l'objet, et en même temps et du même coup, une exigence rationnelle du sujet, relativement à la connaissance.

VI

Improbable et probable.

On peut s'étonner pourtant, au point de vue ration-

nel, voire expérimental, du caractère paradoxal d'une évolution qui procède d'un état improbable vers des états de probabilité croissante ; on peut s'étonner encore d'un évanouissement progressif du mouvement ordonné dans le mouvement désordonné régi par les seules lois du hasard. (Nous prenons cette expression dans son sens bien accepté aujourd'hui et qui alors ne présente plus d'équivoque).

Qu'un système évolue selon la ligne de plus grande probabilité, il nous semble qu'il y a là quelque chose de nécessaire, de tout à fait rationnel d'après la définition même de la probabilité. Est probable ce qui a le plus de chances de se réaliser, donc ce vers quoi tend tout processus d'évolution. Sur le terrain expérimental nous disons de même qu'un événement est probable quand on peut prévoir qu'il se réalisera de préférence à tout autre. Au fond ligne de probabilité ou ligne de prévisibilité c'est tout un. Le déterminisme s'exerce dans la direction la plus probable, là où toutes les causes ne sont pas individuellement saisissables. Ce qui est le cas de tout système physico-chimique constitué par un grand nombre de molécules.

Mais d'autre part les événements objectifs se déroulent d'après un cycle, puisque la loi du retour éternel est une des lois suprêmes de l'objet. La théorie cinétique des gaz, la mécanique statistique, cette application pure et simple de la théorie des probabilités, postulent nécessairement le retour éternel. Elles sont l'image mêmes de ce retour. Or la théorie des probabilités entraîne nécessairement, et c'est ce qu'il faut bien voir, l'apparition des faits improbables, des « complexions » les plus improbables d'après les données mêmes du problème posé. Elle l'entraîne aussi nécessairement que l'apparition des « complexions », des événements les plus probables. La fréquence en est moindre voilà tout : « A qui dispose du temps, rien d'impossible » pour reprendre le mot d'Hésiode ; et l'Univers objectif — toutes réserves faites sur l'idée

de création — dispose du temps. Du moins il est construit comme s'il en disposait. Ce n'est que d'une volonté extérieure à lui qu'a pu venir un premier commencement, que pourra venir une fin dernière. L'éternité est corollaire de l'inertie matérielle, objective, et le retour éternel corollaire de l'éternité.

On a pu cacher, au milieu de milliards et de milliards de grains de blé, un grain d'orge. Si je dispose du temps, fatalement, inéluctablement, je retrouverai le grain d'orge. Les 0 peuvent s'ajouter indéfiniment au chiffre des milliards, pourvu que, comme l'Univers objectif, je dispose du temps.

Il n'y a donc rien d'étrange à l'image représentative des mouvements moléculaires dans la théorie cinétique.

Le cycle peut être repéré par rapport à un état des plus probables aussi bien qu'à un état des plus improbables. Le retour éternel exige qu'il n'y ait ni commencement ni fin. Point d'origine privilégiée. Nous pouvons prendre pour origine l'état du système que nous voulons. Et fatalement d'après le calcul des probabilités tous les états possibles défileront devant qui dispose du temps : les moins probables comme les plus courants, et en vertu de la même loi. L'impossibilité des premiers rendrait tout aussi impossibles les seconds.

Il faut s'entendre d'ailleurs sur ce mot improbable, et encore plus sur une expression que nous avons rencontrée quelquefois : *improbabilité infinie*, — ou lorsqu'on recule devant l'association contradictoire de ces deux termes, comme Brunhes « *quasi-infinie* ». Là encore nous retrouvons l'anthropormorphisme. Il est d'ailleurs bien naturel, puisque nous sommes hommes ; mais comme le naturel, quand on le chasse, il revient au galop. Le temps est relatif (au sens philosophique vulgaire et non Einsteinien du mot). Une journée pour un éphémère peut paraître comme notre vie : une seconde pour des êtres encore bien plus éphémères, peut paraître l'infini. Inversement, la durée d'une

galactie, d'un système sidéral, peut être comptée comme une seconde pour une pensée qui vivrait dans l'inverse rapport avec la pensée humaine. Le temps effroyable, *pour nous, hommes*, $10^{10^{10}}$ siècles, est par rapport à l'infini, bien moins qu'une seconde, puisqu'il n'est rien. Sachons prendre les choses en philosophes, objectivement. La mesure du temps est une relation, et elle fait le temps long ou court, selon l'étalon auquel elle se réfère, dans l'espèce, l'aspect humain de la durée. Mais un événement qui revient tous les $10^{10^{10}}$ siècles, se présentera $10^{10^{10}}$ fois, c'est-à-dire si l'on prend de façon anthropomorphique et abusive l'infini dans le sens où on le joignait tout à l'heure à improbabilité, une infinité de fois, à une pensée qui durerait $10^{10^{10}}$ fois plus que $10^{10^{10}}$ siècles. Et qu'y a-t-il de surprenant à parler de cette durée dans l'ordre de la pensée, si elle est le tout ? Improbable signifie qui ne se présente pas souvent, par rapport à une certaine tranche du temps, mais qui se présentera *certainement*.

Il est même logique d'ailleurs, et tout à fait conforme à l'expérience, que le début d'une évolution soit un moment, un instant *rares*, par rapport à l'évolution elle-même : une naissance par rapport à une vie, un cataclysme sidéral, la naissance d'une étoile par le choc de deux astres morts, comparée à la durée de cette étoile. La raison, comme l'expérience, exigent que le début d'une évolution — début tout relatif d'ailleurs, et repère tout subjectif encore — soit infiniment rare par rapport à l'ensemble de l'évolution elle-même. Sans quoi il n'y aurait pas évolution mais succession discontinue. Or, il y a évolution, direction vectorielle, dans les événements physiques, mais direction vectorielle à rebroussement, à renversement : révolutions qui se déroulent de façon cyclique, révolutions comme dans nos machines, si nous nous donnons le temps.

Or, la pensée, même la pensée humaine, par son idée de l'infini, entendue aussi pauvrement qu'on le voudra, au sens d'indéfini par exemple, la pensée humaine, par son pouvoir de répétition qui n'est autre que le principe d'additivité, principe premier de la science, bref, par sa puissance de création anticipatrice, dispose précisément du temps. Devant elle défilent en un instant tous les états possibles, même s'il leur faut des siècles comptés par l'unité suivie d'autant de zéros qu'on voudra. Elle est apparentée à l'infini, malgré toutes ses limites, parce qu'elle est de la pensée.

L'état improbable est donc un des éléments nécessaires du cycle, comme les états probables. Dire au fond que l'évolution se fait selon le clivage de la plus grande probabilité, c'est dire que les états probables sont beaucoup plus fréquents que les états improbables. L'accroissement de l'entropie n'a point d'autre sens. Et l'irréversibilité est l'apparence la plus commune que donne aux faits objectifs l'immensément plus grande fréquence des états de très haute probabilité, en face des états de très haute improbabilité.

VII

La réalité du retour éternel.

L'idée du retour éternel n'est en définitive que l'affirmation que toute évolution est relative. Considérée dans un temps suffisamment long, elle s'effectue comme si elle pouvait toujours se recommencer : serpent qui se mord la queue.

Si rien ne se perd et si rien ne se crée, il n'y a pas *une* évolution, il y a une suite de révolutions (au sens astronomique du mot), révolutions qui repassent à peu près par les mêmes points. Le Dr Le Bon (1) a

(1) Epigraphe de l'*Evolution de la matière*. En 1881, la même année que Nietzsche, il avait formulé l'hypothèse

de la façon la plus expressive formulé un principe d'évolution en disant : Rien ne se crée, tout se perd. De même André Lalande en opposant dissolution à évolution. Mais la physique contemporaine s'est efforcée de retrouver l'adage de Lucrèce : « Rien ne se crée, rien ne se perd ». Il semble bien que ce soit à la fois une exigence de l'objet, et une exigence de notre pensée. Une exigence de l'objet : car — à moins d'un acte extérieur à l'Univers — où croît dans l'Univers, ce qui se perd, si l'Univers comprend tout ce qui est ? Et comment se fait-il, si l'objet se suffit à lui-même, que tout ne se soit déjà perdu ? Une exigence du sujet, en somme pour les mêmes motifs : car la raison ne peut s'expliquer ni création *ex nihilo*, ni retour *ad nihilum*. Elle peut les formuler ; elle pourrait les constater. Elle ne peut les comprendre.

Le retour éternel se manifeste donc comme une virtualité de toute cette partie du réel que nous pouvons isoler et qui s'isole d'elle-même, dans la catégorie de la matière et de l'objet, vulgairement de l'externe, quoique cette dernière expression, plus immédiatement compréhensible, n'ait ni la profondeur, ni la richesse des deux premières, et n'en soit qu'une approximation, qu'une image grossière.

L'impossibilité du retour éternel, l'impossibilité de toute possibilité de retour éternel est au contraire la marque de l'interne, du subjectif, du règne de l'esprit.

La coupure s'institue au point de départ de notre connaissance et de notre conscience — de notre existence — et va en se creusant et en se précisant de plus en plus, dans toute image de la réalité. Et toute image ou toute chose appartient à la fois aux deux

du retour éternel dans un autre ouvrage *L'homme et les sociétés*. Et, comme on voit, nos conclusions se rapprochent beaucoup plus de celle-ci que de celle-là.

mondes antithétiques, contraires, mais non contradictoires, puisqu'ils ne font qu'un, en vérité.

Comme dans le mythe du Banquet ces deux unités de l'être, séparées mais non étrangères, se recherchent et doivent s'unir dans la vraie figure des choses. Elles ont, étant complémentaires, même valeur sur le plan de l'être, sinon sur notre plan, à nous, et pour tous les humains jugements de valeur.

Loi de cette partie du réel qui se laisse cristalliser dans le nécessaire, l'universel et l'objectif, la notion de retour éternel devient principe de toute connaissance objective, dans notre pensée qui l'y découvre ou la retrouve, mais qui la *touchait* déjà en elle ; puisque la divergence des deux domaines n'est que de « l'après » et non de « l'immédiat », ou de « l'originel ». C'est pourquoi elle apparaît comme une des idées directrices fondamentales de notre science.

Il fallait bien que Zarathustra arrivât enfin à la grande idée de retour éternel. Elle est inévitable. Et Nietzsche qui, en 1881, par une intuition de génie, d'un des plus grands génies philosophiques de notre histoire humaine, voulait consacrer dix ans de sa vie à étudier les sciences de la nature pour fonder son idée du retour sur la théorie atomique, Nietzsche n'aurait aujourd'hui qu'à enregistrer les conséquences de la théorie cinétique. Elle valait d'être, comme elle est restée, le point central de sa pensée : « Que serait-ce si, de jour ou de nuit, un démon te suivait une fois dans la plus solitaire de tes solitudes et te disait : « Cette vie, telle que tu la vis actuellement, telle que tu l'as vécue, il faudra que tu la revives encore une fois, et une quantité innombrable de fois ; et il n'y aura en elle rien de nouveau, au contraire ! il faut que chaque douleur et chaque joie, chaque pensée et chaque soupir, tout l'infiniment grand et l'infiniment petit de ta vie reviennent pour toi, et tout cela dans la même suite et le même ordre — et aussi cette araignée et ce clair de lune entre les arbres, et aussi

cet instant et moi-même. L'éternel sablier de l'existence sera retourné toujours à nouveau — et toi avec lui, poussière des poussières (1) ! »

« Tous les états que ce monde peut atteindre, il les a déjà atteints, et non pas seulement une fois, mais un nombre infini de fois. Il en est ainsi de ce moment : il était *déjà* une fois, beaucoup de fois, et de même il reviendra, toutes les forces étant réparties exactement comme aujourd'hui ; et il en est de même du moment qui a engendré celui-ci et du moment auquel il a donné naissance. Homme ! Toute ta vie, comme un sablier sera toujours à nouveau retournée et s'écoulera toujours à nouveau, chacune de ces existences n'étant séparée de l'autre que par la grande minute de temps nécessaire pour que toutes les conditions qui t'ont fait naître se reproduisent dans le cycle universel. Et alors tu retrouveras chaque douleur et chaque joie, et chaque ami et chaque ennemi, et chaque espoir, et chaque erreur et chaque brin d'herbe et chaque rayon de soleil, et toute l'ordonnance de toutes choses. Ce cycle dont tu es un grain brille à nouveau. Et dans chaque cycle de l'existence humaine, il y a toujours une heure où chez un individu d'abord, puis chez beaucoup, puis chez tous, s'élève la pensée la plus puissante, celle du retour éternel de toutes choses — et c'est chaque fois pour l'humanité l'heure de midi (2) ».

Et du pessimisme qu'une réflexion superficielle et puérile pourrait apparemment, et si vite, tirer de la loi du retour éternel, Zarathustra fait sortir la plus haute, la plus triomphante victoire d'un optimisme dur, vigoureux et sain, car il semble pressentir que loi suprême de l'objet, le retour éternel est lié dans

(1) Nietzsche, *Le gai savoir*, tr. fr., p. 295, op. 341.
(2) *Id.*, Werke, XII, 122 (Œuvres posthumes), trad. de Henri Lichtenberger in *La Philosophie de Nietzsche*, p. 162 (Paris, Alcan).

l'unité du réel à l'éternité tout court, loi suprême de la pensée.

« Combien il te faudrait aimer la vie et que tu t'aimes toi-même pour ne plus *désirer autre chose* que cette suprême et éternelle confirmation (1).

« Est-ce là — la vie ? dirai-je à la mort. « Eh bien alors — encore une fois ! »

« O homme prends garde. — Que dit le minuit profond ? — Je dormais, je dormais, — me voici réveillé d'un rêve profond ; — le monde est profond, — et plus profond que ne le pensait le jour. — Profonde est sa douleur, — sa joie plus profonde encore que sa souffrance. — La douleur dit : Péris ! — mais toute joie veut l'éternité — veut une profonde, profonde éternité (2). »

Mais l'éternité spirituelle est bien autre chose encore que le consentement joyeux au retour éternel. L'amour de la vie c'est l'amour de l'acte ; car vivre c'est agir. Et agir ne serait-ce point penser ? L'action inconsciente, si elle n'est pas une absurdité dans les termes, est la définition même de la passion de « l'être agi ». Dans l'univers de l'objet,il n'y a qu'action subie, continuité du mouvement. Le retour éternel, voilà la marque même de l'action subie.

Mais nous consentons joyeusement au retour éternel, parce que, par tout ce qui ne se laisse pas réduire à l'objet, nous le dépassons. L'acte spirituel se dresse en face du retour éternel et le transcende. Il se suffit à lui-même, inconditionnel comme lui, mais autrement que lui, par son infinitude propre et sa qualité. La durée d'*une* conscience est l'image même d'un progrès, et non d'un retour,bien qu'elle ne soit qu'une manière appauvrie et toute humaine d'apercevoir

(1) Nietzsche, *Le gai savoir*, tr. fr., p. 296.

(2) Nietzsche, *Ainsi parla Zarathustra.* Werke, p. 461-471. Mêmes pages dans la traduction française de H. Albert. Cité ici d'après la traduction de Henri Lichtenberger dans *La philosophie de Nietzsche*, Paris, Alcan.

l'infini et la qualité, d'apercevoir la pensée pure, qui, elle, ne se laisse exprimer, au delà du temps et de la durée, que par l'éternité.

L'humaine pensée, l'humaine conscience, notre univers subjectif, s'oppose à l'univers objectif puisqu'elle est tout ce qui ne s'y laisse pas réduire. On en peut dresser les catégories et les aspects en termes antinomiques avec ceux de l'objet, et comme leurs antithèses et leurs contraires. Ils se correspondent deux à deux comme les extrémités de mêmes lignes, car ils appartiennent au même réel, d'où l'abstraction, nécessité des existences particulières, les a tirées. Le sujet s'oppose ici à la continuité indéfinie du temps objectif, lieu des retours éternels, par ce qu'il dure. L'analyse bergsonienne, de cet angle, nous paraît incontestable. Mais la durée pensante, par là même, est une ascension vers l'éternité, ce point immobile et en même temps cette complexité infinie qui transcende toute durée, comme tout cycle : compréhension parfaite, intelligence et raison en acte qui enveloppe tout dans son irréfragable unité.

Dégradations de cette éternelle présence, la durée de la conscience, comme le retour des choses, qui tous deux impliquent temps et changement, tous deux aussi substituent le toujours à l'instant éternel et le sans fin, à l'infini. Mais la durée, la pensée humaine est plus près de la réalité que l'objet, bien qu'ils en expriment tous deux des aspects nécessaires, une fois donnée la séparation, la création des êtres particuliers, à partir de l'être. Elle en est plus près parce qu'elle a, elle aussi, sa fin présente en elle-même, parce qu'elle n'est pas un cycle fermé, mais une tendance, un progrès qui, donc, ne se répète pas ; bref parce qu'elle est, elle aussi, intelligence et raison, tandis que son objet est seulement intelligibilité et rationalité.

« Est » entendons : « tendent à être ». La pensée humaine et son objet n'atteindraient leur fin qu'à la limite, qui est inaccessible. Mais toute définition est

limite. Plutôt, toute définition nous fait passer à la limite. Elle appartient à la catégorie de l'idéal. Ne serait-ce pas en cela qu'elle touche la vérité ? et par ce qu'elle transcende d'un coup d'état rationnel, les apparences (1).

(1) Nous comptons reprendre ultérieurement, à travers la physique du discontinu et de la relativité, les indications que nous venons d'esquisser.

La loi du retour éternel est régulatrice de l'objet, si l'objet doit se suffire à lui-même.« Se suffire à lui-même » n'est-ce pas sa définition même ? Est objectif ce qui n'a pas besoin d'autre chose que soi pour être pensé, ce qui vaut par soi et en soi, et par suite pour toute pensée : nécessité et universalité, rationalité parfaite et intelligibilité complète, inconditionnelle. L'objet a en lui-même toutes ces conditions.

Du moins c'est l'idéal que nous poursuivons, dans l'analyse abstractive qui nous a conduit à opposer deux faces du réel.

Cet idéal entraîne aussi bien en logique que dans l'expérience la discontinuité du réel. Le retour éternel implique un réarrangement incessant d'éléments susceptibles de reproduire les mêmes configurations. Il réclame la création du changement, du devenir,par les seuls arrangements.De là il suit toujours, dans la logique comme l'expérience, que l'objet, pour se suffire à lui-même, pour être, par lui-même, et seulement par lui-même, intelligible et rationnel, doit être créé dans son devenir par tous les arrangements dus au hasard selon le calcul des probabilités. C'est ainsi que le hasard devient la marque même de l'intelligible et du rationnel : Parce que sont données *toutes* les combinaisons possibles dues au hasard, telles que l'intelligence les conçoit et que la raison les organise et les compte. C'est une exigence rationnelle que toutes se présenteront, et que n'importent ni leur ordre ni leur degré de probabilité. En face, la durée subjective ne se prend qu'au choix, ne se continue que par le choix, et n'est donnée que dans le choix. Mais le choix aspire toujours à s'éclairer et tend vers l'intelligible. C'est lui qui, au lieu du hasard, reflète, mais à un degré plus intime, la rationalité de l'être, dans sa plénitude, donc dans sa liberté, laquelle ne fait qu'un avec ce qui *nous* apparaît comme nécessaire.

CONCLUSION

« Mais c'est la pensée qui est le tout »
(H. Poincaré.)

Plaçons-nous d'abord sur le terrain de l'expérience commune, du sens commun.

La connaissance comporte des choses à connaître et un esprit qui connaît en face l'un de l'autre.

Ces deux termes s'analysent progressivement au fur et à mesure que la connaissance se précise en même temps qu'elle s'élargit.

Les choses à connaître, « l'autre », nous les voulons connaître comme elles sont, et non comme nous croyons qu'elles sont. Peu importe que nous y réussissions jamais, ou non. C'est le but ici qui, seul, intéresse.

Nous voulons donc y mettre le moins de nous-même que nous puissions. Nous cherchons à les connaître *objectivement*. Cet effort d'objectivité entraîne que l'*objet* sera débarrassé de tout apport de l'esprit, de toute projection du sujet, de tout élément subjectif : isolé de ce qui paraît nous appartenir en propre à nous-mêmes, de notre organisation individuelle, de tout ce qui dépend de nous.

Le critère de l'indépendance complète de l'objet par rapport à notre subjectivité, c'est précisément qu'il doit se suffire complètement à lui-même. Et pour qu'il se suffise complètement à lui-même, il faut que sa loi soit celle du retour éternel, sa nature celle d'une multiplicité régie par le principe d'addivité, d'organisation incessante des éléments avec eux-mêmes : cette nature et cette loi s'impliquent.

Voilà pourquoi, à notre sens, toute connaissance de la matière, de l'objet, toute physique tend à s'ordonner à la loi du retour éternel.

Aussi la loi du retour éternel se présente-t-elle à nous comme une double exigence de l'objet d'une part, de l'organisation de la connaissance dans le sujet, plus brièvement, de l'intelligence rationnelle, d'autre part. Celle-ci qui s'est instaurée afin de connaître les choses qui ne dépendent pas de nous, grâce à cette méthode que nous appelons la science, est forcément imprégnée par les grandes lois constitutives de ces choses, puisqu'elle s'est développée au milieu d'elles, à leur contact, par une sorte d'évolution intérieure au réel lui-même.

Si nous essayons de transcender le dualisme de la connaissance, pour retrouver l'expérience primitive, il nous semble possible de recourir à la très hypothétique hypothèse que voici.

L'expérience primitive, l'unité réelle de « ce qui est d'abord », par une sorte de péché originel, se laisse rompre peu à peu en deux domaines : L'un obéit aux lois de ce que nous avons appelé l'objet : inertie, multiplicité, extériorité, retour éternel. L'autre comprend tout ce flux mouvant mais continu et un, dont nous prenons conscience quand nous essayons de prendre conscience de notre nature propre.

Entre ces deux domaines, il y a passage incessant, car des nuances subjectives laissent toujours un résidu objectif, à l'analyse expérimentale et réciproquement.

C'est ainsi que se constitue la science en découvrant l'objectif sous le subjectif ; mais aussi en laissant irréductible toute cette part de subjectif qui est notre être propre.

Pourrions-nous dire que nous sommes en face d'une pensée qui s'explicite à la fois en géométrique et en psychologique, en intuition intellectuelle et rationnelle, et en intuition interne, en intuition tout court

presque dans l'acception que M. Bergson a donnée à ce mot ? la première, créatrice de la science et de l'objet ; la seconde, créatrice du monde des valeurs et de notre propre personnalité ?

Dirions-nous encore que l'une et l'autre se rejoignent non seulement par un passage possible — de l'une à l'autre — passage toujours limité dans cette pensée fragmentaire qu'est la pensée humaine ? — mais encore, à la source, et par là d'une façon permanente, substantielle, au-dessous de la coupure ? Si bien qu'il y a, malgré toutes les analyses, analogie synthétique profonde entre leurs termes ?

La loi de retour éternel dans l'objet c'est alors la vision extérieure de l'intuition intérieure de notre éternité : « *Sentimus et experimur nos æternos esse* » (1).

Dès l'instant qu'il y a de l'être, l'être est éternel, car d'où viendrait-il, et où irait-il ? Et quel être, quelle réalité, quoi d'autre que le néant, si ce n'est conscience ?

Est-ce là la question « Etre ou ne pas être ». Alors il n'y a pas de milieu entre le Néant et la Pensée.

Juillet 1925.

(1) Spinoza, *Ethices*, V. prop. XXIII, scholie.

FIN

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE III

PRAGMATISME, SUBJECTIVISME ET ÉNERGÉTISME

DEUXIÈME PARTIE

LE RETOUR AU RETOUR ÉTERNEL

LIVRE PREMIER

LES MOYENNES ET LES APPARENCES GLOBALES

LIVRE II

LES PROBABILITÉS ET L'INDIVIDUEL

TROISIÈME PARTIE

ÉPILOGUE

A LA SUITE DE LA PHYSIQUE CINÉTISTE

Etablissements André Brulliard, Saint-Dizier (Haute-Marne). — 12-1926

Bibliothèque de Philosophie scientifique (*suite*)

2° PSYCHOLOGIE ET PHILOSOPHIE

APERT (Dr). **L'Hérédité morbide** (5e mille).
AVENEL (Vicomte Georges d'). **Le Nivellement des Jouissances** (5e mille).
BALDENSPERGER (F.), chargé de cours à la Sorbonne. **La Littérature** (5e mille).
BELLET (Daniel), professeur à l'École libre des Sciences politiques. **Le Mépris des lois et ses conséquences sociales**.
BERGSON, POINCARÉ, Ch. GIDE, etc., **Le Matérialisme actuel** (12e mille).
BINET (A.), directeur du Laboratoire à la Sorbonne. **L'Ame et le Corps** (12e mille).
BINET (A.). **Les idées modernes sur les enfants** (26e mille).
BOHN (Dr G.). **La Naissance de l'intelligence** (40 figures) (8e mille).
BONAPARTE (Marie). **Guerres militaires et guerres sociales** (4e mille).
BOUTROUX (E.), de l'Institut. **Science et Religion** (24e mille).
BOUTROUX (E.). **Morale et Religion** (4e m.)
CLAPARÈDE (Dr E.). **Comment diagnostiquer les aptitudes chez les écoliers** (17 fig.).
CRUET (J.), avocat à la cr d'appel. **La Vie du Droit et l'Impuissance des Lois** (6e m.)
DAUZAT (Albert), docteur ès lettres. **La Philosophie du langage** (6e mille).
DELMAS (F.), médecin des asiles et BOLL (M.). **La Personnalité humaine** (4e mille).
DEWEY (John), professeur de Philosophie. **Comment nous pensons**.
DUGAS (L.), agrégé de Philosophie. **La Mémoire et l'oubli** (5e mille).
DWELSHAUVERS (Georges), professeur à l'Université de Bruxelles. **L'Inconscient** (5e m.).
GAULTIER (Paul). **Leçons morales de la guerre** (5e mille).
GUIGNEBERT (C.), professeur à la Sorbonne. **L'Évolution des Dogmes** (7e m.).
HACHET-SOUPLET (P.), Dr de l'Institut de Psychologie. **La Genèse des instincts** (4e m.)
HESNARD (Dr A.). **Les Psychoses et les frontières de la folie** (7 fig.).
JAMES (William), de l'Institut. **Philosophie de l'expérience** (10e mille).
JAMES (William). **Le Pragmatisme** (11e m.)
JAMES (William). **La Volonté de croire** (8e m.)
JANET (Dr), de l'Institut, professeur au Collège de France. **Les Névroses** (11e mille).
JANET (Dr). **La Médecine psychologique** (4e mille).
JULLIOT (Ch.-L.). **L'Éducation de la Mémoire** (6e mille).
LASKINE (Edmond). **Le Socialisme suivant les peuples** (4e mille).
LE BON (Dr Gustave). **Psychologie de l'Éducation** (29e mille).
LE BON (Dr Gustave). **La Psychologie politique** (19e mille).
LE BON (Dr Gustave). **Les Opinions et les Croyances** (17e mille).
LE BON (Dr Gustave). **La Vie des Vérités** (11e mille).
LE BON (Dr Gustave). **Enseignements psychologiques de la Guerre** (36e mille).
LE BON (Dr Gustave). **Premières Conséquences de la Guerre** (29e mille).
LE BON (Dr Gustave). **Hier et Demain. Pensées brèves** (12e mille).
LE BON (Dr Gustave). **Psychologie des temps nouveaux** (11e mille).
LE BON (Dr Gustave). **Le déséquilibre du Monde** (11e mille).
LE DANTEC. **Savoir** (12e mille).
LE DANTEC. **L'Athéisme** (21e mille).
LE DANTEC. **Science et Conscience** (10e m.)
LE DANTEC. **L'Egoïsme** (14e mille).
LE DANTEC. **La Science de la Vie** (8e m.).
LOMBROSO. **Hypnotisme et Spiritisme** (13e mille).
MACH. **La Connaissance et l'Erreur** (6e m.)
MAXWELL. **Le Crime et la Société** (7e m.)
MAXWELL (J.). **La Magie** (4e mille).
MAYER (Lt-Colonel Émile). **La psychologie du commandement**.
NAUDEAU (Ludovic). **La guerre et la paix**.
PAULHAN (Fr.). **Les Transformations sociales des sentiments** (4e mille).
PERRET, Dr MAZEL et Dr NOYER. **L'orientation professionnelle**.
PICARD (Edmond). **Le Droit pur** (9e mille).
PICARD (E.). **Les Constantes du Droit**.
PIÉRON (H.), Me de Confs à l'École des Htes-Études. **L'Évolution de la Mémoire** (6e m.).
RAMSAY MACDONALD (J.). **Le Socialisme et la Société**.
RAGEOT (Gaston). **La Natalité, ses lois économiques et psychologiques.**
REY (Abel), professeur à la Sorbonne. **La Philosophie moderne** (15e mille).
REY (Abel). **Le retour éternel et la philosophie de la physique.**
VASCHIDE (Dr). **Le Sommeil et les rêves** (8e mille).
VILLEY (Pierre), professeur agrégé de l'Université. **Le Monde des aveugles** (5e m.).

Bibliothèque de Philosophie scientifique

1° SCIENCES PHYSIQUES ET NATURELLES

APERT (Dr). **La Croissance**

AVENEL (Vte G. d'). **L'Évolution des Moyens de Transport.**

BACHELIER. **Le Jeu, la Chance et le Hasard** (7e mille).

BELLET. **L'Evolution de l'Industrie** (5e mille).

BERGET (A.), profr à l'Inst. océanogr. **Les Problèmes de l'Océan** (43 fig.) (5e mille).

BERGET (A.). **La Vie et la Mort du Globe** (10e mille).

BERGET (A.). **Problèmes de l'atmosphère** (27 fig.) (5e m.).

BERTIN (L.-E.), de l'Inst. **La Marine moderne** (66 fig.) (7e m.).

BIGOURDAN, de l'Institut. **L'Astronomie** (50 fig.) (9e mille).

BLARINGHEM (L.). **Les Transformations brusques des êtres vivants** (49 fig.) (7e m.).

BLARINGHEM (L.). **L'Hérédité expérimentale** (4e mille).

BOHN (G.) et DRZEWINA (A.). **La Chimie et la Vie** (4 fig.) (5e m.)

BOINET (Dr). **Les Doctrines médicales** (9e mille).

BONNIER (G.), de l'Inst. **Le Monde végétal** (230 fig.) (13e m.).

BOUBIER (Maurice), Dr ès sciences. **L'Oiseau et son milieu.**

BOUTARIC (A.). **La Vie des atomes** (40 fig.) (5e m.).

BOUTARIC (A.). **La lumière et les radiations invisibles** (55 figures).

BOUTY (E.), de l'Institut. **La Vérité scientifique** (7e m.).

BOUVIER (E.-L.), de l'Inst. **Habitudes et Métamorphoses des insectes** (4e mille).

BOUVIER (E.-L.) de l'Inst. **Vie psychique des insectes** (6e m.)

BOUVIER. **Le communisme chez les insectes** (24 fig.).

BRUNHES (B.). **La Dégradation de l'Energie** (10e m.).

BURNET (Dr Etienne). **Microbes et Toxines** (71 fig.) (9e m.).

CAULLERY. **Problèmes de la Sexualité** (9e mille).

COLSON (A.), profr à l'Ec. Polyt. **L'Essor de la Chimie** (8e m.)

COMBARIEU (J.). **La Musique** (18e mille).

CONKLIN. **L'Hérédité et le Milieu** (43 fig.) (4e mille).

DASTRE (Dr A.), de l'Institut. **La Vie et la Mort** (20e mille).

DELAGE (Y.), de l'Inst. **Les Théories de l'Evolution** (11e m.).

DELAGE (Y.) et GOLDSMITH (M.) **La Parthénogénèse** (5e mille).

DELBET (Dr P.). **La Science et la Réalité** (6e mille).

DEPERET, de l'Inst. **Transformations du Mde animal** (8e m.).

ENRIQUES. **Concepts fondamentaux de la Science** (4e m.)

GASCOUIN (Général). **L'Evolution de l'Artillerie** (6e m.).

GRASSET (Dr). **La Biologie humaine** (11e mille).

GUIART (Dr). **Parasites inoculateurs** (108 fig.) (6e mille).

GUILLEMINOT (H.). **La Matière et la Vie** (4e mille).

HERELLE, de l'Inst. Pasteur. **Défenses de l'organisme.**

HERICOURT (Dr J.). **Les Frontières de la Maladie** (10e m.)

HERICOURT (Dr J.). **L'Hygiène moderne** (15e mille).

HERICOURT (Dr J.). **Les Maladies des Sociétés** (5e m.).

HOUSSAY (F.), pr à la Sorbonne. **Force et Cause** (4e mille).

HOUSSAY. **Nature et Sciences naturelles** (8e mille).

IOTEYKO (Dr Josefa). **La Fatigue** (13 fig.) (5e mille).

JAUNEAUD (M.). **L'Evolution de l'aéronautique** (34 fig.).

JAUNEAUD (M.). **L'Aviation militaire et la guerre aérienne** (18 figures).

JOUBIN (Dr L.). **La Vie dans les Océans** (45 fig.) (10e mille).

JOUBIN (Dr L.). **Les métamorphoses des animaux marins** (71 fig.).

LAUNAY (L. de), de l'Inst. **Histoire de la Terre** (14e m.).

LAUNAY (L. de), de l'Inst. **La Conquête minérale** (5e m.).

LE BON (Dr Gustave). **L'Evolution de la Matière** (40e m.).

LE BON (Dr Gustave). **L'Evolution des Forces** (25e m.).

LEGÈNE (Dr P.). **L'Evolution de la Chirurgie** (40 figures).

LE CHATELIER (H.), de l'Institut, pr à la Faculté des Sciences. **Science et Industrie** (4e m.

LECLERC DU SABLON. **Incertitudes de la Biologie** (6e m.)

LECORNU, de l'Institut. **La Mécanique** (12 fig.) (6e mille).

LE DANTEC (F.). **Les Influences ancestrales** (16e mille).

LE DANTEC (F.). **La Lutte universelle** (12e mille).

LE DANTEC (F.). **De l'Homme à la Science** (10e mille).

LOC[illegible]D (Dr Ed.). **L'Enquête criminelle** [illegible].

MARTEL. **L'Évolution souterraine** (80 fig.) (7e mille).

METALNIKOV (S.), de l'Inst. Pasteur. **Immortalité et rajeunissement.**

MEUNIER (S.) pr au Muséum. **Convulsions de la Terre** (6e m.

MEUNIER (S.). **Histoire géologique de la Mer** (5e m.)

MEUNIER (S.). **Les Glaciers et les montagnes** (4e m.).

MOCH (Gaston). **La Relativité des phenomènes** (8e mille).

OSTWALD. **L'Evolution d'une science, La Chimie** (11e m.)

PELLEGRIN (Colonel F.-L.-L.). **La Vie d'une armée** (12 fig.)

PERRIER (Edm.), de l'Inst. **A Travers le monde vivant** (7e m.)

PERRIER (Edm.). **La Vie en action** (6e mille).

PICARD (Emile), de l'Inst. **La Science moderne** (14e m.)

POINCARE (H.). **La Science et l'Hypothèse** (40e mille).

POINCARE (H.), de l'Inst. **La Valeur de la Science** (32e m.)

POINCARE (H.). **Science et méthode** (22e mille).

POINCARE (H.). **Dernières Pensées** (17e mille).

POINCARE (Lucien). **La Physique moderne** (22e mille).

POINCARE (Lucien). **L'Electricité** (16e mille).

POINCARE (Lucien). **Éducati[illegible] Science Patrie.**

TISSIE (Dr). **L'Education physique et la Race** (24 fi.) (5e m[illegible]

ZOLLA (Daniel). **L'Agriculture moderne** (8e mille).

PSYCHOLOGIE, PHILOSOPHIE ET HISTOIRE

Voir la liste des ouvrages parus pages 2 et 3 de la couverture

9157. — **Paris.** — **Imp. Hemmerlé, Petit et Cie.** 1-1927.